



Concepts cinématiques et raisonnements naturels : étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences.

Edith Saltiel

► To cite this version:

Edith Saltiel. Concepts cinématiques et raisonnements naturels : étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences. . Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Paris VII, 1978. Français. NNT : . tel-01275111

HAL Id: tel-01275111

<https://theses.hal.science/tel-01275111>

Submitted on 17 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS VII

THESE DE DOCTORAT D'ETAT

PRESENTEE A L'UNIVERSITE PARIS VII

PAR

Edith SALTIEL

Pour obtenir le grade de Docteur es Sciences Physiques

Sujet de la thèse: "Concepts cinématiques et raisonnements naturels: étude de la
compréhension des changements de référentiels galiléens par
les étudiants en sciences"

Soutenue le 21 Juin 1978 devant la Commission d'Examen:

MM. M. HULIN	Président
F. BRESSON	Examineur
G. DELACOTE	"
P. GUIDONI	"
J.L. MALGRANGE	"
P. NOZIERES	"
J.L. OVAERT	"

Je tiens avant tout à citer l'ensemble de l'équipe avec laquelle j'ai fait mes premiers pas dans l'enseignement; sous l'impulsion de P.Nozières, elle a su éveiller mon intérêt pour la Didactique et a peut-être été à l'origine de ce travail. Que P.Nozières et ses collaborateurs d'alors, en partie dispersés aujourd'hui, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Ce travail est né d'une collaboration fructueuse avec J.L. Malgrange et L.Viennot. Ensemble, nous avons défini le cadre général de nos recherches et dégagé au fil des années, une méthodologie adaptée aux types de problèmes abordés. Que J.L. Malgrange et L.Viennot trouvent ici mes remerciements amicaux pour l'aide qu'ils m'ont apportée à la réalisation de ce travail.

F.Bresson a largement contribué à la définition des objectifs de recherche de notre équipe: les nombreuses discussions, toujours intéressantes, que nous avons eues avec lui, nous ont encouragés à poursuivre notre tâche. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Je remercie chaleureusement M.Hulin: il fut l'un des premiers physiciens à suivre avec intérêt nos premiers travaux; par la suite, il a saisi toutes les occasions pour faire connaître les thèmes abordés par notre équipe. Son soutien et ses conseils ne nous ont jamais fait défaut.

Je remercie G.Delacote, P.Guidoni et J.L. Ovaert, qui m'ont fait bénéficier de leurs conseils en critiquant le manuscrit de cette thèse.

Toute ma gratitude va également vers les enseignants de Paris VI, de Paris VII et de l'école primaire de la rue du Château des Rentiers, trop nombreux pour être cités individuellement ici: ils ont permis, en acceptant d'associer leurs étudiants et élèves à nos expériences, la réalisation de ce travail.

Que soient de même remerciés tous les étudiants qui ont très gentiment accepté de collaborer avec nous.

Je remercie enfin S.Girard et L.Fayt qui ont assuré la dactylographie du texte avec rapidité, compétence et gentillesse.

TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	1
I. Méthodologie générale	2
II. Problème physique étudié	4
III. Plan d'étude	7
 <u>CHAPITRE I - ENQUETE PRELIMINAIRE</u>	
I. Description du questionnaire	13
II. Résultats	
A. Résultats bruts	19
B. Etude des analogies	22
C. Utilisation de la relation $v = d/t$	26
III. Premières conclusions	
A. Les vitesses	29
B. Les trajets	32
 <u>CHAPITRE II - MATERIEL EXPERIMENTAL</u>	
I. <u>Techniques expérimentales</u>	
A. Procédures méthodologiques	
1 - Généralités	37
2 - Construction des tests	38
3 - Nature des tests	40
4 - Déroulement des tests	40
B. Population interrogée	41
C. Dépouillement des tests : mode d'analyse	42
II. <u>Expérience dépassement</u>	
A. Description de l'expérience	45
1 - Généralités	46
2 - Nature de l'expérience	46
3 - Nature des tests	46

4 - Enoncé des tests	49
5 - Population interrogée	51
B. Résultats bruts	51
C. Etude des justifications et des résultats bruts	57
1 - Comparaison des tests "mouvement"	57
2 - Comparaison des tests "position"	59
3 - Les distances parcourues	60
<u>III. Expérience rivière</u>	
A. Présentation de l'expérience	
1 - Généralités	62
2 - Nature de l'expérience	62
3 - Les différents tests proposés	64
4 - Population interrogée	66
B. Résumé des principaux résultats	66
C. Analyse des résultats	
1 - Le rôle des référentiels	70
2 - Le moteur et ses conséquences	73
D. Une expérience complémentaire : le tapis roulant	77
Annexe A : Résultats détaillés de l'expérience	81
<u>IV. Expérience caillou</u>	
A. Présentation de l'expérience	
1 - Nature de l'enquête	101
2 - Nature des tests	102
3 - Population interrogée	104
B. Analyse et résumé des résultats	
1 - Les trajectoires	105
2 - Les distances parcourues	108
3 - Les durées de parcours	110
Annexe B : Résultats détaillés de l'expérience	112
 <u>CHAPITRE III - COMPARAISON DES MODELES NATUREL ET CINEMATIQUE</u>	
<u>Introduction</u>	124
I. <u>Le modèle cinématique</u>	127
II. <u>Le modèle naturel</u>	
A. Aspect explicatif du modèle	130

1 - La vitesse est-elle une grandeur relative ?	130
2 - Qu'est-ce que la vitesse ?	134
3 - Relation moteur-mouvement	138
4 - Combinaison de moteurs : vitesse et force	141
5 - Conclusion	144
B. Aspect descriptif du modèle	
1 - Le mouvement comme déplacement d'un point à un autre	145
2 - Les points de vue de plusieurs observateurs : mouvements vrais et apparents	155
C. Un exemple d'utilisation du modèle : construction de trajectoires	
1 - Rappel des éléments rencontrés dans le modèle	161
2 - Les trajectoires droites	162
3 - Les trajectoires incurvées	164
III. <u>Comparaison des modèles naturel et cinématique</u>	
Introduction	168
A. Différence et contradiction entre les deux modèles	169
1 - Résumé des principales différences conceptuelles	169
2 - Absence de référentiel	170
3 - Mouvement propre - immobilité	172
4 - Les distances parcourues	173
5 - Les trajectoires	174
6 - Le moteur, propriété de l'objet	177
B. Deux exemples	
BI. Analyse de copies d'examen	179
1 - Enoncé des exercices	180
2 - Résultats et discussion	
a) Résultats d'ensemble	181
b) Association moteur-vitesse	183
c) Les trajectoires	185
d) Relation entre distances parcourues et trajectoires	186
e) Un exercice traditionnel comme outil de contrôle	187

B2. Analyse de discussions suscitées par un film -

Introduction

1 - Déroulement des discussions	189
2 - Analyse des discussions	192
a) Le problème du ballon	192
b) Mouvements apparents et vrais	199
3 - Conclusion	202

IV. La cinématique et les enfants

Introduction	203
--------------	-----

A. Notions cinématiques chez l'enfant, selon Piaget	204
B. Etude de deux expériences piagésiennes	205
1 - Expérience de l'escargot	205
2 - Expérience des cyclistes	207
3 - Conclusion	212
C. Description et résultats de l'expérience enfants	212
1 - Principe de l'expérience	212
2 - Déroulement des expériences	215
3 - Population interrogée	220
4 - Résultats	220
a) Résultats de la partie I	221
b) Comparaison des expériences A et C	221
c) Comparaison des expériences B et A	223
D. Conclusion	224

V. Le modèle naturel et l'histoire

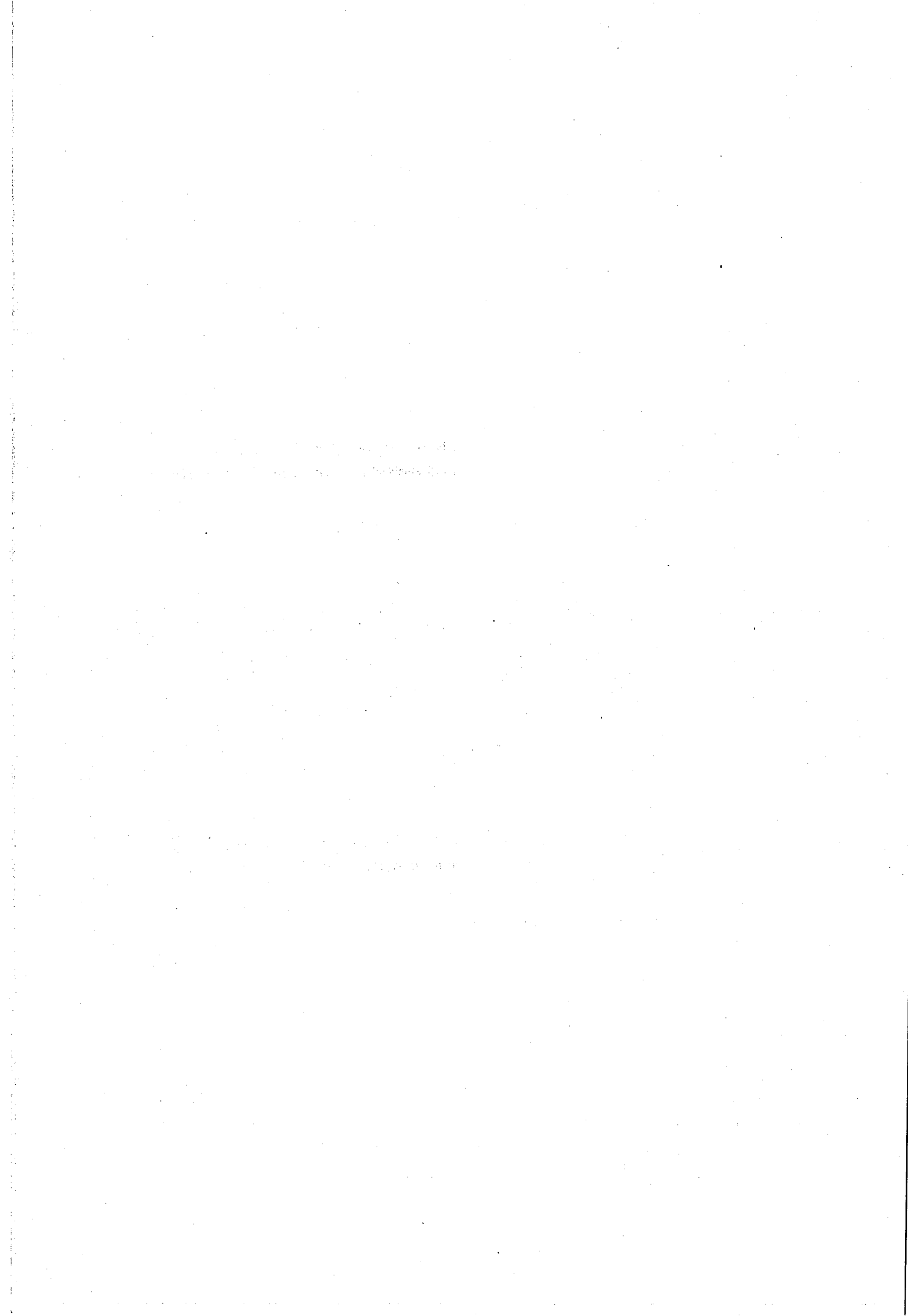
Introduction	226
A. Le mouvement "réel" au cours des âges	227
B. Nature des obstacles rencontrés	230
C. Conclusion	239
Annexe 1 - Papier de Huyghens	240
Annexe 2 - Extraits du tome II du Dictionnaire de M. Bresson	241

VI. Critiques et suggestions pour l'enseignement

Introduction	242
A. Référentiels - positions - distances	244

B. Les vitesses	
1 - Les situations proposées	248
2 - Les schémas géométriques	249
C. Les trajectoires	251
D. Le vocabulaire	252
E. Conclusion	254

<u>CONCLUSION GENERALE</u>	257
----------------------------	-----



INTRODUCTION

Il peut apparaître surprenant de consacrer une étude aussi longue au seul problème de la composition des mouvements en translation uniforme à une et deux dimensions.

Si, au cours des siècles, nos ancêtres ont rencontré de nombreux obstacles avant d'arriver à éliminer les notions de mouvement et de repos absolus et à séparer la cinématique de la dynamique, aujourd'hui toutes les notions de cinématique classique sont clarifiées et ne devraient pas, en principe, être difficiles à comprendre, à enseigner et à utiliser. Les programmes scolaires et les différents manuels reflètent cet état de fait. Si l'on en croit les projets de programme de physique pour la classe de seconde¹, on doit y parler de repère et du caractère relatif du mouvement mais sans s'appesantir dessus, ces notions étant reconnues par tous comme aisément compréhensibles. De même, à l'université où est enseignée la cinématique classique, les manuels et les cours accordent une place limitée à ce problème : quelques pages de théorie centrée principalement sur l'étude de la loi de composition des vitesses, puis quelques exercices d'application consistant, pour l'essentiel, à vérifier que l'étudiant sait effectivement appliquer cette loi ; la majeure partie de ce programme de cinématique étant consacré à l'étude de la transformation des accélérations, problème nettement plus complexe que le précédent.

Or, tout enseignant a constaté que des difficultés surgissent à l'occasion de l'étude des collisions dans le repère du centre de masse, du mouvement des planètes, de l'effet Doppler... C'est surtout en enseignant la relativité restreinte que l'on s'aperçoit que les bases de la cinématique classique ne sont pas acquises.

Plutôt que de faire porter la responsabilité de ces échecs tant aux enseignants (secondaires et universitaires) qu'aux enseignés, nous avons choisi d'interroger l'intéressé lui-même (l'enseigné) afin de mieux cerner les difficultés qu'il rencontre, de connaître les obstacles sur lesquels il bute et principalement le niveau auquel ils se situent.

L'étude qui suit est une recherche des processus de raisonnement des étudiants ou encore de certains éléments de procédures utilisées lorsque ceux-ci sont amenés à résoudre des problèmes de physique.

I. METHODOLOGIE GENERALE

La démarche suivie ici appelle un certain nombre de remarques :

a) Nous n'avons pas cherché à tester l'aptitude de l'étudiant à appliquer une formule, contrairement à la majorité des exercices traditionnels. Chacun sait que le calcul permet très souvent d'escamoter la compréhension et que ce n'est pas parce que l'étudiant applique une formule ou fait un calcul qu'il a forcément compris la physique de l'exercice. C'est pourquoi nous avons choisi de proposer aux étudiants des énoncés d'exercices comportant un minimum de chiffres et de notations afin qu'ils puissent mieux expliciter la façon dont ils utilisent les éléments contenus dans l'énoncé, sans avoir la possibilité de se raccrocher à des notations ou des formules "miracles".

b) Cette étude n'est pas une évaluation de résultats au sens classique du terme. Nous n'avons jamais cherché "la bonne réponse" (celle du physicien, bien sûr), mais nous avons essayé de comprendre comment l'étudiant arrive à fournir une réponse, quelle que soit par ailleurs celle-ci. Cela implique d'essayer de comprendre comment l'étudiant interprète et comprend le problème posé, de connaître les éléments de l'énoncé et les schèmes correspondants qui lui servent de points de départ dans son raisonnement et enfin de voir comment ces éléments sont utilisés dans la solution proposée.

c) Cette étude n'a pas été menée essentiellement dans un but d'apprentissage : il n'a jamais été question de trouver les exercices et leurs présentations qui favorisent "la bonne réponse". Notre souci a été de comprendre, en effet, comment tel exercice, telle présentation conduit l'étudiant à fournir une réponse plutôt qu'une autre. Cependant, il va de soi que les résultats de l'étude présentée ici ne seront pas sans influence sur l'enseignement et sur la construction d'un cours.

d) Cette étude, enfin, ne cherche pas à savoir si l'étudiant a atteint un stade de pensée formelle² (au sens piagétien du terme) ou si, au contraire, il en est encore au stade de pensée concrète. Là encore, ce n'est pas parce que l'on constate que l'étudiant se conduit, vis-à-vis de certains problèmes, comme s'il était à l'un de ces stades que l'on a compris ce qui dans le problème conduit l'étudiant à avoir un tel comportement. Nous avons ici toujours essayé de comprendre comment l'étudiant arrive à un résultat plutôt qu'à un autre.

Notre matériel expérimental étant constitué d'énoncés de problèmes et de réponses accompagnées de commentaires, nous n'avons pas voulu étudier les processus de résolution de problème en tant que tels. Tout ce que nous avons cherché à faire c'est d'ordonner les réponses fournies en essayant de dégager un certain nombre d'éléments qui sont à "l'origine" des solutions et des raisonnements proposés. Quand nous disons "à l'origine", cela ne signifie pas que les étudiants procèdent explicitement de cette façon, mais que leurs réponses s'expliquent si l'on admet que ces éléments sont pris comme points de départ. En d'autres termes, l'interprétation proposée revient à dire : "tout se passe comme si...". Nous ne prétendons, donc, pas décrire le comportement d'un étudiant pris individuellement (chacun suivant un cheminement qui lui est propre), mais seulement des tendances d'ensemble.

Si une expérience unique permet de dégager certains éléments, rien ne permet d'affirmer que ceux-ci revêtent un caractère de généralité : ils peuvent dépendre de l'étudiant, de son passé scolaire, extra-scolaire, du problème posé, etc. Afin de s'affranchir au maximum de ces paramètres (certains étant difficilement mesurables

et contrôlables), nous avons bâti plusieurs expériences différant tant par la situation physique étudiée que par la présentation de l'exercice que par la population interrogée. C'est, ensuite, en confrontant l'ensemble des résultats que nous avons réussi à isoler certains éléments communs à l'ensemble des réponses. C'est à ce niveau qu'intervient un certain nombre d'hypothèses qui constituent l'ossature d'un modèle explicatif des réactions estudiantines. Ce modèle se justifie par le fait qu'il résulte de nombreux allers et retours entre les hypothèses faites au départ et les réponses fournies. Ce "feedback" permanent permet de dégager des schèmes généraux tout en garantissant la validité du modèle proposé.

II. PROBLEME PHYSIQUE ETUDIE

Le problème physique est le suivant : soient deux observateurs A et B en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre qui observent le même objet (prenons, par exemple, un astrophysicien sur la terre et un astronaute sur la lune qui observent un satellite ou une météorite). Chacun de ces observateurs, à l'aide de ses instruments de mesure, obtient des données sur le mouvement de cet objet (vitesse instantanée, accélération, trajectoire suivie, etc.) et arrive ainsi à en faire une description complète. Ces deux descriptions auront des points communs (chaque observateur constatera, par exemple, que la météorite se rapproche de la lune), mais les valeurs des grandeurs physiques mesurées (vitesse, accélération...) seront différentes pour chacun. Le problème est de savoir comment l'on peut passer des résultats obtenus par l'un des observateurs à ceux obtenus par l'autre.

Avant de rappeler quels sont les invariants galiléens et les lois de transformation, nous voudrions préciser les termes de référentiel et d'observateur. La description de tout mouvement nécessite de repérer, à chaque instant, la position du mobile étudié, c'est-à-dire connaître les coordonnées spatio-temporelles du mobile (x, y, z, t) ; mais ce repérage n'a de sens que si l'on précise par rapport à quoi.

Les physiciens définissent donc un système de référence (appelé souvent référentiel ou encore repère) matérialisé par un ensemble de mètres et d'horloges rigidement liés entre eux et indéformables auquel est associé un observateur qui a pour tâche de faire les mesures. Or, dans le langage courant, ces termes de système de référence ou repère et d'observateur ont des sens différents : la notion de repère est souvent liée à l'espace seulement. Prenons par exemple deux promeneurs situés en des points différents : ils peuvent définir la position d'un clocher d'église en utilisant des "repères" différents (arbre, accident de terrain, etc.). Ces différents "repérages" ou "changements de repères" n'en sont, en fait, pas puisqu'ils se font dans le même référentiel.

De même, un observateur est, dans le langage courant, un personnage qui regarde, observe un phénomène ou un paysage. Cet observateur-là n'a nullement besoin de définir un référentiel et encore moins de faire des mesures : il est très différent de l'observateur physicien.

Ces précisions étant données, indiquons maintenant les lois de transformations et les invariants galiléens qu'il faut connaître et maîtriser pour pouvoir résoudre tout problème de cinématique.

a) La loi de composition des vitesses

$$\vec{v}_B(O) = \vec{v}_A(O) + \vec{v}_B(A) \quad \text{où } \vec{v}_B(O) \text{ est la vitesse de}$$

l'objet O mesurée par B, c'est-à-dire la vitesse de O dans le référentiel de B. Cette relation est souvent présentée dans les manuels de la façon suivante : $\vec{v}_a = \vec{v}_r + \vec{v}_e$ où \vec{v}_a est la vitesse absolue de l'objet, \vec{v}_r sa vitesse relative et \vec{v}_e la vitesse d'entraînement, c'est-à-dire la vitesse de l'observateur A dans le référentiel de B.

Lorsque les deux observateurs A et B sont au repos dans le même référentiel, on a alors $\vec{v}_B(O) = \vec{v}_A(O)$. C'est donc la vitesse d'entraî-

nement qui fait intervenir le fait que les deux observateurs sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre.

b) Invariance des intervalles de temps qui résulte d'un postulat important de la mécanique classique : le temps est universel $\Delta t_A = \Delta t_B$ ou $t_A = t_B$; ce qui signifie que si les horloges des deux observateurs sont synchronisées, ils trouveront tous deux, dans leurs référentiels, la même valeur pour la durée d'un phénomène physique.

c) Invariance des longueurs ou de façon plus générale des distances instantanées :

$$l_A = l_B$$

Par distance instantanée, nous entendons distance qui sépare deux points à un instant donné : cette distance instantanée peut être aussi bien la longueur d'un objet rigide que celle d'un objet déformable que la distance qui sépare deux objets en mouvement. Ces trois distances instantanées sont invariantes par changements de référentiels bien que conceptuellement de nature différente. Cette identité de leurs propriétés, vis-à-vis des changements de référentiels est liée au fait qu'on les mesure au même instant et que le temps est le même pour tous les observateurs.

d) Loi de composition des trajets.

Il est facile de déduire cette loi de a et de b puisque la relation $v = d/t$ (en supposant la vitesse uniforme) est valable dans chaque référentiel. On obtient la loi suivante :

$$\vec{d}_B(O) = \vec{d}_A(O) + \vec{d}_B(A) \quad \text{où } \vec{d}_B(O) \text{ représente la distance}$$

parcourue par l'objet O mesurée par l'observateur B.

Comme on le constate, le bagage mathématique nécessaire est minime : au maximum il faut savoir additionner deux vecteurs, ce que la majorité des étudiants est capable de faire. Le mauvais maniement de l'outil formel mathématique ne peut certainement pas, à lui seul, expliquer les difficultés rencontrées par les étudiants.

En revanche, certaines notions conceptuelles en jeu ne sont pas simples, comme par exemple celle de référentiel : l'introduction de mètres et d'horloges transportables d'un lieu à un autre supposent de nombreuses hypothèses sur les lois physiques qui sortent du cadre de la seule cinématique. Bien qu'il puisse paraître évident que toute grandeur physique (vitesse...) n'ait de sens que si elle est définie par rapport à un observateur ou un référentiel et que tout mouvement ou repos d'un objet ne peut être défini de façon intrinsèque, il est très fréquent de parler de mouvements réels, vrais par opposition à des mouvements apparents (cf. le langage courant et celui de l'astronomie). Cette différenciation est interdite en cinématique puisqu'il n'existe aucune hiérarchie entre les différents mouvements observés : la question est de savoir si cette différenciation verbale est une simple commodité de langage ou si, au contraire, elle révèle une compréhension particulière de ces notions.

Par ailleurs, il est intéressant de savoir si les étudiants ont perçu l'importance des invariants galiléens ainsi que leurs origines, car ce sont eux qui fondent les lois physiques les plus importantes.

Ainsi, résoudre un problème de cinématique consiste non seulement à appliquer des formules mais nécessite une réelle compréhension des principes sous-jacents et des concepts en jeu. C'est cet aspect du problème que nous avons abordé.

III. PLAN D'ETUDE

Lorsque nous avons commencé ce travail, nous savions que les changements de référentiels étaient difficilement acceptés et compris par les étudiants mais nous n'avions aucune idée précise sur ce qui était à l'origine des problèmes rencontrés, ni sur la façon dont les étudiants s'y prenaient pour résoudre un problème de cinématique. Nous décrirons, dans le premier chapitre, l'enquête préliminaire qui nous a permis non seulement de mieux définir notre programme de travail mais aussi d'affiner nos outils de recherches.

Grâce à cette enquête, nous avons constaté que les étudiants admettent difficilement la relativité des vitesses et des distances parcourues, que les réponses fournies sont spécifiques de la situation physique étudiée et enfin qu'ils attribuent les mêmes propriétés, vis-à-vis des changements de référentiels, aux longueurs et aux trajets tout en reconnaissant que ces deux grandeurs sont de nature très différente. Nous avons donc bâti trois expériences qui ont pour mission de nous informer sur ces points.

Le deuxième chapitre de cette étude rend compte de la description de l'ensemble du matériel expérimental : procédure méthodologiques (partie I) et description des trois expériences qui constituent le support de ce travail. La première expérience (expérience dépassement, partie II) a été montée dans le but de savoir jusqu'où allait cette identification des propriétés des longueurs et distances parcourues et parallèlement de voir si les réponses différaient selon l'habillage de l'énoncé. La deuxième expérience (expérience rivière, partie III) porte sur l'étude d'une situation d'entraînement, c'est-à-dire lorsque l'objet est lié physiquement à un mécanisme d'entraînement. En effet, lors de l'enquête préliminaire, c'est ce type de situation qui favorisait les "bonnes réponses". Afin de mieux cerner et mieux comprendre les raisonnements utilisés, nous avons posé un problème à deux dimensions, contrairement à celui de l'enquête préliminaire qui était à une dimension : l'étudiant est alors obligé d'explicitier ses transformations géométriques et la façon dont il obtient les grandeurs transformées. La troisième expérience (expérience caillou, partie IV) a été construite dans le but de compléter la précédente en étudiant les réactions des étudiants à un problème formellement identique à celui de la rivière, mais pour lequel il n'y a plus d'entraînement.

Par ailleurs, les deux dernières expériences portent sur les vitesses, les distances parcourues et les trajectoires, alors que la première ne porte que sur les distances instantanées et les trajets.

Chaque expérience est suivie de ses principaux résultats et de ses conclusions propres, avec un minimum d'interprétation.

C'est au cours du troisième chapitre que l'ensemble des résultats sera analysé et interprété.

La partie I rappelle les principaux résultats du modèle cinématique ; le modèle étudiantin de la cinématique, que nous appellerons naturel, afin d'indiquer par ce terme qu'il ne correspond pas forcément à un acquis scolaire, est explicité dans la partie II. Nous verrons alors que ce modèle est double : à la fois descriptif, comme celui de la cinématique, et explicatif. Bien que ces aspects soient intimement entremêlés, nous les avons séparés, pour la clarté de l'exposé, tout en citant à chaque fois les résultats des différentes expériences qui le justifient. Cette séparation artificielle entre les deux aspects du modèle naturel n'aide pas le lecteur à le situer par rapport au modèle cinématique et à voir d'une part sa cohérence et, d'autre part, les contradictions auxquelles il aboutit. La partie III est donc consacrée à comparer les deux modèles afin de dégager les principales divergences et contradictions. Nous en profiterons pour montrer que ce modèle n'est pas spécifique de nos expériences et qu'on le retrouve à l'occasion d'activités non construites comme outil de recherche : l'analyse de copies d'examen et de discussions peu guidées entre étudiants illustrent bien les deux aspects du modèle naturel ainsi que la façon dont ils interfèrent. Cette dernière analyse confirme et valide le modèle explicité plus haut.

Si ce modèle résiste autant à l'enseignement, c'est en partie parce qu'il s'instaure très tôt. Dans la partie IV, nous nous sommes intéressés aux comportements des enfants. Nous nous appuyerons sur les travaux effectués par l'Ecole piagétienne et analyserons une expérience que nous avons réalisée avec des enfants. Les résultats de cette analyse confirment notre hypothèse de départ : le modèle naturel est déjà présent à un âge précoce.

Dans la partie V, nous nous tournerons vers l'histoire afin de comparer certains aspects des différents modèles historiques à ceux du modèle naturel. Nous retrouverons, là encore, de nombreuses similitudes.

Dans la deuxième partie (partie VI), nous essaierons de montrer que l'enseignement et les manuels ne permettent aucunement de remettre en cause le modèle naturel et participent très souvent à le renforcer.

Nous terminerons enfin par quelques suggestions susceptibles de modifier la situation actuelle.

CHAPITRE I

DESCRIPTION ET RESULTATS DE
L'ENQUETE PRELIMINAIRE

Le but de cette enquête est de savoir comment les étudiants résolvent des problèmes de changement de référentiels, de connaître les difficultés qu'ils rencontrent et la nature des obstacles sur lesquels ils butent.

Nous avons eu des entretiens individuels*, avant la rentrée universitaire, avec 46 étudiants en première année de faculté et n'ayant donc reçu aucun enseignement à l'Université sur cette partie de la physique. Ce choix peut surprendre, mais chercher à savoir comment réagissent des sujets qui ne sont pas censés connaître une théorie approfondie des changements de référentiels nous a paru être une approche pour comprendre et cerner les difficultés rencontrées par des étudiants plus avancés dans leurs études.

Cette enquête a été adaptée au public interrogé : nous avons donné à chaque étudiant trois énoncés d'exercices identiques du point de vue formel mais différents par les situations physiques décrites. Aucun calcul n'est demandé. Le questionnaire a pour objectifs essentiels de connaître :

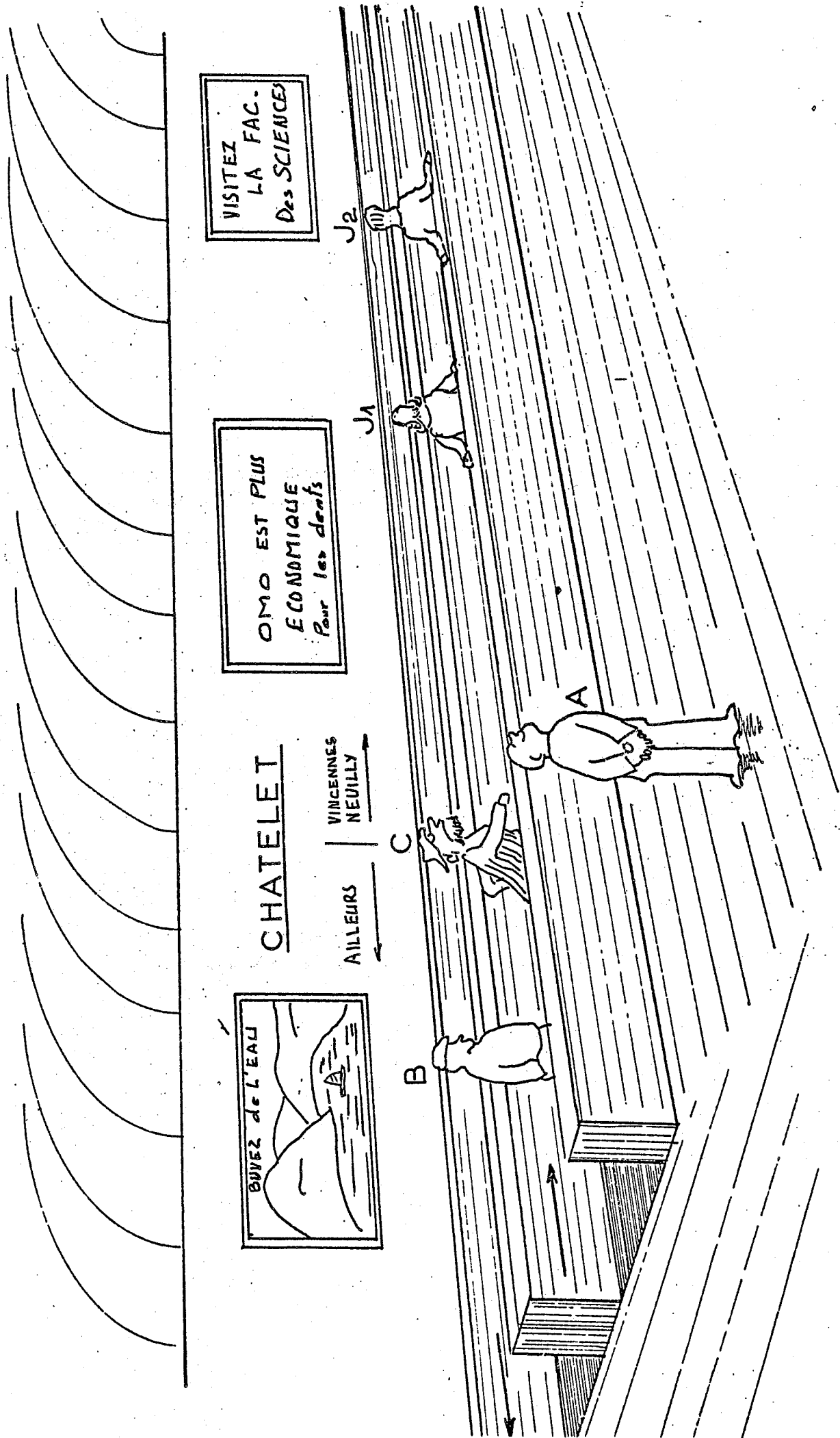
- les situations physiques et les grandeurs physiques pour lesquelles les étudiants rencontrent des difficultés

- la façon dont les étudiants perçoivent les analogies. En effet, si l'étudiant donne des réponses différentes à des questions analogues, c'est-à-dire portant sur la même grandeur physique mais apparaissant dans des exercices différents, comment peut-on l'amener à fournir des réponses identiques, qu'elles soient toutes justes ou fausses ?

- la nature des contre-exemples qui permettent à l'étudiant de se corriger (un contre-exemple proposant une situation dont l'analogie avec l'un des trois problèmes est manifeste)

- les relations entre grandeurs physiques différentes qu'il a utilisées, à l'intérieur d'un même exercice. En particulier, tout

* Entretiens réalisés par J.L. Malgrange, L. Viennot et moi-même.



(Figure 1)

étudiant sortant du lycée est censé connaître la relation entre les trois grandeurs vitesse, distance parcourue et intervalle de temps ($v = d/t$). A-t-il utilisé cette relation ?

I. DESCRIPTION DU QUESTIONNAIRE

A. Première partie

On fait lire à l'étudiant les énoncés des trois exercices suivants :

Dans chaque exercice, on suppose que les différents observateurs disposent de suffisamment de moyens pour mesurer avec la précision qu'ils désirent, et dans leur repère, les objets considérés.

Exercice 1

Dans une rivière, deux nageurs flottent, sans mouvement ; chacun est accroché à une bouée individuelle. L'un d'eux est entraîné à son insu par un fort courant, à vitesse constante.

Un petit poisson saute à peu près dans une direction parallèle à celle du courant.

Exercice 2

Deux parachutistes descendent verticalement, animés chacun d'une vitesse limite différente, mais constante pour chacun. L'un d'eux perd ses lunettes, l'autre les rattrape.

Exercice 3

Nous sommes au métro Chatelet dans le grand couloir que deux immenses tapis roulants permettent de parcourir plus vite. Deux hommes, l'un A, debout, est arrêté sur le trottoir fixe, l'autre B, est sur un des tapis roulants, accoudé à la rampe. Sur ce même tapis marche un troisième homme C. Les deux premiers, A et B, le regardent.

Les personnages J_1 et J_2 que vous voyez sur le dessin (fig. 1) sont sur le même tapis et sont arrêtés à une certaine distance l'un de l'autre. Pour le moment, J_1 et J_2 n'interviennent pas dans cette partie de l'exercice.

Ces trois exercices décrivent trois situations différentes tant par les mouvements des observateurs que par celui de l'objet.

Pour les exercices 1 et 3, l'un des observateurs est fixe dans le repère terrestre, l'autre étant mobile dans ce référentiel.

En revanche, la façon dont se déplace l'objet varie d'un énoncé à l'autre : dans l'exercice 1, l'objet (le poisson) se déplace indépendamment des observateurs ; dans l'exercice 3, l'objet (C) est entraîné par le tapis roulant.

Dans l'exercice 2, les deux observateurs ont des mouvements différents dans le repère terrestre et les lunettes sont, soit tenues par l'un des observateurs donc liées physiquement à ce dernier, soit en chute libre, l'objet n'est plus lié physiquement aux observateurs.

Ces trois énoncés, bien que limités en nombre, nous ont paru représenter un éventail suffisant de situations différentes pour une enquête préliminaire.

Après lecture des énoncés, on a posé à l'étudiant les 25 questions suivantes auxquelles il doit répondre par oui, par non ou je ne sais pas. L'étudiant et l'expérimentateur notent par écrit les réponses.

Liste des questions posées

Exercice 1

Les grandeurs suivantes sont-elles les mêmes pour les deux nageurs ?

- Q1 - Temps que le poisson passe hors de l'eau
- Q2 - Longueur du poisson
- Q3 - Longueur du saut du poisson
- Q4 - Hauteur du saut
- Q5 - Vitesse du poisson à un instant donné
- Q6 - Accélération à un instant donné
- Q7 - Energie cinétique

Exercice 2

Les grandeurs suivantes sont-elles les mêmes pour les deux parachutistes ?

- Q8 - Durée de chute des lunettes
- Q9 - Hauteur de chute des lunettes
- Q10 - Hauteur d'un parachute
- Q11 - Vitesse des lunettes à un instant donné
- Q12 - Accélération des lunettes au cours de la chute
- Q13 - Vitesse des lunettes lorsque l'un des parachutistes les tient
- Q14 - Accélération des lunettes lorsque l'un des parachutistes les tient
- Q15 - Poids des lunettes lorsque l'un des parachutistes les tient
- Q16 - Poids des lunettes lorsqu'elles tombent
- Q17 - Energie cinétique des lunettes

Exercice 3

Les grandeurs suivantes sont-elles les mêmes pour les deux observateurs A et B ?

- Q18 - Durée d'un pas de C
- Q19 - Largeur d'une affiche
- Q20 - Hauteur d'une affiche
- Q21 - Distance parcourue par C en un pas

- Q22 - Vitesse d'une affiche à un instant donné
- Q23 - Vitesse de C à un instant donné
- Q24 - Accélération de C à un instant donné si celui-ci change d'allure
- Q25 - Energie cinétique de C à un instant donné.

Pour chacun de ces exercices, on retrouve les mêmes grandeurs physiques : vitesse, distance parcourue, énergie cinétique...

B. Deuxième partie

Cette partie concerne les questions sur les vitesses (Q5-11-13-22-23). En fait, pour alléger le questionnaire, nous n'avons tenu compte que des réponses à quatre questions seulement (Q11-13-22-23) qui concernent les deux derniers exercices.

Dans un premier temps, on teste la cohérence des réponses à l'ensemble de ces quatre questions. Si l'étudiant a fourni des réponses différentes à l'une au moins de ces questions, on lui demande* ce qui, dans les énoncés, justifie à ses yeux de donner des réponses différentes. L'étudiant peut alors modifier une ou plusieurs réponses ou les maintenir toutes. Le but recherché ici est de tenter d'amener l'étudiant à fournir quatre réponses identiques (toutes fausses ou toutes correctes). Si l'étudiant n'y arrive pas, il doit alors nous indiquer les éléments de la situation qui sont à l'origine de ce comportement.

Une deuxième étape concerne les étudiants qui donnent d'emblée ou après modification des réponses cohérentes mais fausses : on tente alors de les corriger à l'aide de contre-exemples.

Enfin, à tous les étudiants qui donnent, à un moment ou à un autre, quatre réponses justes, on demande de formuler une règle générale.

* La question posée est la suivante :
 "Relisez les questions 11 et 13 d'une part, 22 et 23 d'autre part. Voyez-vous une différence entre ces deux couples de questions qui justifie que l'on réponde différemment à chacun d'eux".

rale qui permettrait de trouver les réponses à ces questions ou à d'autres analogues.

C. Troisième partie

Cette partie concerne les trois questions sur les trajets (Q3-9-21). Là encore, nous testons la cohérence des réponses fournies. Si toutes les réponses ne sont pas identiques, on pose la question suivante :

"A la question : la distance X est-elle la même pour les deux observateurs, vous avez répondu :

- oui, lorsqu'il s'agissait de (Q3 ou Q9 ou Q21)
- non, lorsqu'il s'agissait de (" " ")

Voyez-vous une différence entre ces deux situations qui justifie ces réponses différentes ?".

Certains étudiants ayant répondu, par exemple, oui à Q3, oui à Q9 et non à Q21, se sont vus poser deux fois la question précédente, l'une portant sur Q3 et Q21, l'autre sur Q9 et Q21.

Le but recherché est encore d'arriver à ce que l'étudiant modifie ses réponses jusqu'à ce qu'elles deviennent toutes les trois identiques. Lorsque ce but est atteint, on demande à l'étudiant de citer toutes les questions analogues à Q3 afin de savoir s'il distingue les questions portant sur les longueurs de celles portant sur les trajets. Ensuite est reprise la même procédure qu'à la deuxième partie : on essaie d'amener l'étudiant à fournir des réponses correctes grâce à des contre-exemples.

Lors de la construction de ce questionnaire, nous pensions qu'il serait facile d'amener l'étudiant à donner des réponses identiques à toutes les questions analogues : ce ne fut pas le cas et nous reviendrons sur ce point lors de l'exposé des résultats.

D. Quatrième partie

Cette partie comporte les quatre questions successives suivantes :

"Pour répondre aux questions précédentes, avez-vous utilisé dans un même exercice, une relation entre grandeurs physiques différentes ?".

Puis :

"Voyez-vous maintenant, à la réflexion, une relation qui puisse servir à vérifier la cohérence de vos réponses à l'un des exercices précédents et, si oui, laquelle ?".

Puis :

"Dans l'exercice 3, la relation : vitesse = distance parcourue/temps de parcours semble-t-elle applicable pour les deux observateurs ? (avec des valeurs numériques différentes pour chacun d'eux)".

Cette question est complétée, pour ceux qui ont répondu non, par :

"Est-elle applicable pour :

- un seul observateur ?
- aucun observateur ?

Le but est d'apprécier les rapports entre les réponses fournies par les étudiants et l'usage d'un modèle formel qu'ils sont censés posséder, en partie du moins : s'ils connaissent très peu ou pas du tout la théorie des changements de référentiels, on peut penser qu'ils savent tous que $v = d/t$ et qu'ils l'ont utilisé à de nombreuses reprises.

E. Présentation de l'enquête aux étudiants

La durée de chaque entretien a varié de une heure à une heure trente.

Au préalable, nous avons expliqué à chacun pourquoi nous faisons une telle expérience et ce que nous attendions d'eux. Nous leur avons expliqué qu'il ne s'agissait pas d'un examen déguisé et que nous désirions connaître la façon dont ils comprenaient les exercices et comment ils s'y prenaient pour donner une réponse. Cela supposait qu'ils ne soient pas gênés de nous dire ce qu'ils ne comprenaient pas, d'autant plus que ce type de travail était inhabituel pour eux. Nous avons été étonnés de constater la facilité avec laquelle ils ont tous accepté la règle du jeu : certains, enchantés de la séance, ont déclaré qu'ils avaient appris beaucoup plus de physique en une demi-heure que durant leurs études !

Initialement, nous ne devions pas interroger nous-mêmes les étudiants. En effet, nous devions utiliser l'Ordinateur pour Etudiants

de Paris VII. Cet ordinateur devait être équipé, pour la rentrée universitaire correspondante, d'un système lui permettant de relever des réponses différentes à des questions analogues. C'est, en fait, à cause des possibilités limitées de cet ordinateur que nous n'avons pas interrogé systématiquement les étudiants sur la question 5. L'ordinateur n'étant pas prêt à fonctionner à la rentrée, nous avons décidé de le "remplacer" nous-mêmes en s'aidant des ordinogrammes très précis construits à cette intention.

Lors de la construction de ces ordinogrammes, nous ne pouvions prévoir toutes les réactions des étudiants tant aux questions posées qu'aux contre-exemples fournis. Nous avons prévu, au cas où l'étudiant maintiendrait contre vents et marées ses réponses, une sortie "appel à l'assistant". Les résultats montrent que l'assistant aurait été sans cesse dérangé et que ce sont ces discussions qui sont les plus riches d'informations. Ceci montre les limites d'utilisation d'un tel ordinateur pour la recherche.

II. RESULTATS

Nous ne donnerons ici que les résultats sur les vitesses et les trajets; l'interview ayant porté essentiellement sur ces deux grandeurs physiques.

A. Résultats obtenus à la première partie

a) Vitesses

- Réponses obtenues :

Tableau I

	NON (juste)	OUI (faux)	% faux
Q5	33	13	30
Q11	29	17	36
Q13	34	12	26
Q22	43	3	6,5
Q23	41	5	10

- Structure par étudiant :Tableau II

Q5	Q11	Q13	Q22	Q23	
N	N	N	N	N	19
N	N	O	N	N	7
O	O	N	N	N	7
N	O	N	N	N	3
O	O	O	N	N	2
N	O	O	N	N	2
O	O	N	O	O	2
N	N	N	N	O	2
O	N	N	N	N	1
O	O	O	O	O	1

Nombre total des
sujets = 46

- Conclusions

Le tableau II indique que seulement 41 % des étudiants ne commettent aucune erreur à l'ensemble des questions portant sur les vitesses. Le nombre élevé d'erreurs nous a surpris et nous l'avions beaucoup sous-estimé en construisant le questionnaire. En particulier, nous n'avons pas interrogé les étudiants sur la question 5 qui a pourtant un taux d'échec élevé. Nous avons perdu, ainsi,

une source d'informations.

Enfin, il ressort des tableaux précédents que les étudiants rencontrent des difficultés qui diffèrent d'un exercice à l'autre.

b) Trajets

- Réponses obtenues :

Tableau III

	OUI	NON	% faux
Q3	23	23	50
Q9	29	17	63
Q21	11	35	24

- Structure par étudiant :

Tableau IV

Q3	Q9	Q21	
N	N	N	9
O	O	O	4
O	O	N	12
N	O	N	9
O	N	N	5
N	O	O	4
O	N	O	2
N	N	O	1

Nombre de
sujets : 46

- Conclusions

20 % seulement des étudiants répondent correctement à toutes les questions : ce pourcentage étant beaucoup plus faible que celui obtenu pour les vitesses. Là encore le comportement de l'étudiant varie fortement d'un exercice à l'autre.

B. Etude des analogies

Avoir des questions formellement identiques sous des habillages différents nous permet d'étudier une série de problèmes. Le premier consiste à savoir si l'étudiant repère les questions analogues. Si c'est le cas, cela le conduit-il à fournir les mêmes réponses aux questions analogues et, sinon sur quels facteurs fonde-t-il les différences entre questions ? Ces différences, enfin, sont-elles faciles à surmonter ou bien résistent-elles aux corrections ? Toutes ces questions sont importantes pour saisir les liens entre un modèle formel et une ou des situations physiques particulières.

1 - Reconnaissance des questions analogues

Il nous a paru aller de soi que si l'on demande aux étudiants de citer toutes les questions analogues à Q5, il citera toutes les questions relatives à la vitesse. En revanche, la formulation des questions sur les trajets n'est pas identique (longueur d'un saut du poisson, hauteur de chute des lunettes et distance parcourue par C en un pas) et est, même, ambiguë. C'est pourquoi nous avons demandé aux étudiants de nous citer toutes les questions analogues à Q3. Sur les 44 étudiants arrivés jusque là, 75 % citent Q9 et Q21 et uniquement celles-ci ; les autres nous citent en plus des longueurs. Pour certains, ce mélange est dû à une ambiguïté de langage. Malgré une formulation ambiguë de nos questions, il ressort que la majorité savent distinguer les questions portant sur les trajets de celles portant sur les longueurs.

2 - Réponses aux questions analogues

Si les questions portant sur la même grandeur physique sont bien repérées, les réponses peuvent être différentes comme le montre l'ensemble des réponses de chaque étudiant (cf. tableau IV).

De même, si nous étudions les corrélations entre les questions portant sur les vitesses et les trajets, nous obtenons les tableaux suivants :

a) Vitesses

La seule corrélation nette apparaît entre les questions 5 et 11 :

11 \ 5	0	N
0	12	5
N	1	28

A comparer, par exemple, aux questions 11 et 13 (les autres couples donnent le même genre de résultats).

13 \ 11	0	N
0	5	7
N	12	22

Ces tableaux montrent que seules les questions 5 et 11 sont corrélées, les autres étant indépendantes. Bien que Q5 et Q11 conduisent fréquemment aux mêmes réponses, il n'est pas évident que ce soit pour les mêmes raisons. Hélas, nous n'avons pas interrogé sur Q5, lacune regrettable !

b) Trajets

Pour les trajets, les tableaux de corrélation sont équivalents à celui que l'on obtient pour les questions Q11 et Q13 : les questions, là encore, semblent être indépendantes.

3 - Evolution des réponses aux questions analogues

Les réponses diffèrent d'un exercice à l'autre ; mais que se passe-t-il lorsqu'on rapproche deux questions analogues pour lesquelles l'étudiant a donné des réponses différentes ?

a) Les vitesses

Sur 27 étudiant ayant fait au moins une erreur :

- 2 n'ont pas été interrogés
- 9 se corrigent dès qu'on rapproche deux questions analogues
- pour tous les autres (16), rapprocher deux questions

analogues ne sert à rien. Nous ne sommes pas arrivés à obtenir, de leur part, des réponses identiques aux quatre questions sur les vitesses. Ces étudiants ont eu besoin de contre-exemples et de discussions parfois très longues pour arriver à des réponses cohérentes et par suite correctes, puisque, pour leur faire percevoir l'analogie des situations, il a fallu les corriger. Les étudiants répondent question par question sans d'emblée les relier entre elles. Par exemple :

"Je ne vois pas d'éléments de comparaison entre les couples de questions".

L'analogie entre Q22 (vitesse de l'affiche) et Q13 (vitesse des lunettes quand elles sont tenues) n'est pas perçue :

"à Q13, un personnage tient l'objet que l'on regarde, ce qui n'est pas le cas dans l'exercice 3".

Ou encore :

"à Q22, A est fixe, B est mobile et l'affiche immobile. Pour B l'affiche va dans l'autre sens. A Q11, les lunettes vont dans le même sens que les parachutistes".

"à Q11, les deux parachutistes sont liés à un mouvement qui est l'attraction terrestre, qui les attirent vers le bas. Les vitesses des parachutistes sont différentes mais l'une n'est pas nulle".

b) Trajets

33 étudiants ont donné des réponses différentes aux questions Q3-9-21. Parmi les 13 étudiants à qui l'on demande d'abord les différences entre Q3 et Q21, on constate que :

- 7 corrigent immédiatement leurs réponses (6 → NN, 1 → OO)
- 4 corrigent leurs réponses avec difficulté (3 → NN, 1 → OO)
- 2 maintiennent leurs réponses.

Parmi les 20 étudiants à qui l'on demande d'abord les différences entre Q3 et Q9, on constate que :

- 11 corrigent immédiatement leurs réponses (6 → NN, 5 → OO)
- 7 se corrigent difficilement (5 → NN, 2 → OO)
- 2 maintiennent leurs réponses.

Rapprocher deux questions n'a d'effet immédiat que pour 18/33 étudiants.

Par ailleurs, 18 étudiants se sont vus poser successivement les questions portant sur les différences entre Q3 et Q9 (ou 3 et 21) puis Q3 et Q21 (ou 3 et 9). On constate que :

- seulement 6/18 se corrigent dès qu'on rapproche deux questions : ils se partagent par moitié vers les réponses OO et NN
- tous les autres éprouvent des difficultés à au moins une des questions, dont 10/13 à la deuxième (Q9). Les questions ne sont donc pas a priori de même nature et rapprocher deux questions ne permet pas en général d'aboutir à une réponse commune.

4 - Nature des contre-exemples

Au départ, deux méthodes différentes étaient prévues :

- On fournit à l'étudiant un contre-exemple qui n'a rien à voir avec les situations étudiées, mais pour lequel la vitesse ou le trajet est nul dans un référentiel, non nul dans l'autre (par exemple pour les trajets : deux avions volent aile contre aile. Un observateur est dans l'un des deux avions, l'autre est sur le sol).
- On fournit à l'étudiant un contre-exemple qui est un cas particulier d'une des situations étudiées mais pour laquelle l'étudiant a donné une réponse correcte. Par exemple, si l'étudiant a répondu Oui à la question Q9 et Non à Q3, on modifie la situation de l'exercice 1 afin de la rendre équivalente à celle de l'exercice 2 (le nageur 1 envoie un ballon au nageur 2 ou le poisson saute d'un nageur à l'autre). Les résultats sont les suivants :

Le contre-exemple de l'avion (ou l'équivalent pour les vitesses) n'a absolument pas permis à l'étudiant de se corriger même lorsqu'il répond correctement à ce contre-exemple. Aucun transfert ne se fait entre la réponse fournie à ce contre-exemple et la réponse donnée à l'un quelconque des exercices posés dans cette enquête.

De la même façon, les contre-exemples, où l'on a modifié la situation pour laquelle l'étudiant répond correctement afin de la rendre semblable à celle pour laquelle il donne réponse fausse, sont tout aussi inefficaces. Devant cet état de fait, nous avons, chacun de notre côté, inventé des contre-exemples où l'on modifie, cette fois, la situation pour laquelle l'étudiant a répondu de façon incorrecte.

Les modifications apportées sont de trois types :

- dans l'exercice 2, on modifie le sens des mouvements (film de chute libre où des objets remontent, d'autres descendent)
- dans les exercices 1 et 2, nous avons arrêté l'objet par rapport à l'un des observateurs ou "immobilisé" un observateur : le poisson saute sur place, un parachutiste se met en torche et tombe à la

même vitesse que les lunettes, un parachutiste est accroché à un hélicoptère qui fait du sur place

- dans l'exercice 3, nous avons fait marcher un personnage C' sur le trottoir du métro, C' donnant la main à C.

5 - Conclusions

L'ensemble de ces résultats montrent que les étudiants répondent question par question. Les analogies ne sont pas toujours perçues et souvent refusées. Rapprocher deux questions analogues n'a pas de sens pour l'étudiant, une réponse étant spécifique d'une situation physique, c'est-à-dire d'un certain nombre d'éléments caractéristiques de cette situation. C'est pourquoi les seuls contre-exemples efficaces sont ceux pour lesquels on modifie la situation pour laquelle l'étudiant a des problèmes. Cette modification n'est cependant pas quelconque : il faut, en effet, introduire un mécanisme d'entraînement ou arrêter l'objet par rapport à l'un des observateurs ou "immobiliser" l'un des observateurs.

C. Utilisation de la relation $v = d/t$

Cette relation étant connue de tout étudiant, il nous a semblé important de savoir s'il l'utilise ou non. En effet, avec ce type d'exercice qui n'incite à faire aucun calcul, l'étudiant pensera-t-il à utiliser une formule simple qui permet de vérifier la cohérence de ses réponses ?

Pour ce faire, on peut étudier les corrélations entre les réponses fournies aux questions portant sur les vitesses, trajets et durées ; mais aussi regarder comment l'étudiant répond aux questions de la quatrième partie. Nous citerons, enfin, les résultats d'un autre questionnaire où ce problème a été abordé sous un autre aspect.

a) Etude des corrélations

- Réponses aux vitesses et trajets, sans distinction de réponses aux durées :

Trajet \ Vitesse	Vitesse	
	OUI	NON
OUI	18	45
NON	16	59

(Les réponses aux trois exercices ont été regroupées).

Il n'apparaît aucune corrélation entre les réponses aux trajets et les réponses aux vitesses.

- Si l'on dédouble ces tableaux en tenant compte des réponses aux durées, on obtient globalement :

Trajet \ Vitesse	Vitesse	
	OUI	NON
OUI	17	34
NON	15	47

Durée
juste

Durée
fausse

Trajet \ Vitesse	Vitesse	
	OUI	NON
OUI	11	10
NON	1	13

En dehors du fait que la réponse "non" est souvent associée à une réponse "non" aux vitesses (23/35), il n'y a pas, là non plus, de corrélation entre les réponses aux questions portant sur les vitesses et les trajets. Les réponses sont indépendantes les unes des autres.

b) Réponses à la quatrième partie

32 étudiants sur 42 sont parvenus à ce stade du questionnaire. On leur demandait :

"Pour répondre aux questions précédentes, avez-vous utilisé dans un même exercice, une relation entre grandeurs physiques différentes ?".

Pour s'en tenir à la seule relation $v = d/t$, un seul étudiant a déclaré l'avoir utilisée spontanément. A priori, cette relation n'a donc quasiment jamais servi pour établir une réponse ou pour s'assurer de la cohérence entre réponses différentes.

Lorsqu'ensuite on demande si, à la réflexion, ils ne voient pas une relation qui leur permette de vérifier la cohérence de leurs réponses, 8 étudiants sur 31 pensent que cette relation aurait pu leur être utile. Il faut remarquer que ces huit étudiants ont été, pour la plupart, des étudiants ayant été corrigés aux trajets. A l'occasion des contre-exemples, ont-ils été amenés à utiliser cette relation ? C'est possible, rien dans les compte-rendus, ne permet de le dire ; mais c'est un fait troublant.

c) Résultats du test de la "vedette" (test papier-crayon)

Le problème posé est l'équivalent de l'exercice 2 mais les déplacements sont horizontaux au lieu d'être verticaux. Les observateurs sont alors des marins, l'un se trouve sur un paquebot, l'autre sur un escorteur. L'objet est une vedette qui effectue une manoeuvre qui consiste à aller du paquebot jusqu'à l'escorteur.

Des questions du même type que celles de l'exercice 2 ont été posées ; mais l'étudiant devait à la fin du questionnaire se prononcer sur l'exactitude ou l'inexactitude d'une phrase-type, prétendue extraite de justifications fournies par d'autres étudiants.

Les étudiants ont été interrogés par groupes de vingt à trente, chacun de ces groupes ayant à se déterminer sur une seule phrase. Au total, quatre phrases différentes ont été fabriquées : l'une est correcte* et utilise la relation $v = d/t$, toutes les autres arrivent à une conclusion fausse.

Nous constatons que 90 % des étudiants donnent une réponse justifiée lorsque la phrase proposée est incorrecte alors que 40 %

* La phrase correcte citée est la suivante :

"La vitesse de la vedette, bien sûr, n'est pas la même pour les deux marins car ceux-ci ont des vitesses différentes. La durée de la manoeuvre est la même, donc la distance parcourue par la vedette n'est pas la même pour les deux marins".

des étudiants à qui l'on a proposé la phrase correcte donnent une réponse et seulement 5 % la justifie. Dans ce dernier cas, la phrase est déclarée fausse car :

"le raisonnement est logique, mais la distance parcourue est la même".

Pourquoi si peu d'étudiants donnent-ils une réponse ? Pourquoi si peu justifient-ils la réponse fournie ? Est-ce parce que sa réponse spontanée est contradictoire avec la réponse proposée ? Pourquoi l'étudiant refuse-t-il le raisonnement proposé, bien qu'il soit déclaré logique ? Pourquoi l'étudiant se refuse à reconnaître la validité du modèle formel ?

Cette enquête préliminaire permet déjà de constater que les étudiants répondent de façon indépendante aux questions portant sur les vitesses, trajets et durées et qu'ils ne relient pas ces trois grandeurs entre elles. Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par J. Crépault ; nous aurons l'occasion de revenir sur ce point.

III. PREMIERES CONCLUSIONS

Le point de départ de cette étude, rappelons-le, est de savoir comment les étudiants résolvent des problèmes de changements de référentiels, de repérer les obstacles principaux qu'ils rencontrent en chemin et d'essayer de comprendre l'origine de ces obstacles. Si les résultats que l'on vient de lire ne peuvent conduire à des conclusions décisives, ils vont nous permettre de poser quelques jalons.

a. Les vitesses

a) D'une façon générale, la notion de vitesse semble très peu rattachée à celle de référentiel. Le vocabulaire employé par les étudiants est très net : il n'est jamais question de repère (et encore moins de référentiel qui serait pourtant plus précis). Ils parlent de la vitesse d'un objet (des lunettes, du poisson, etc.)

sans juger utile de préciser la vitesse par rapport à quoi et à qui. Ce vocabulaire est celui du quotidien ; il n'est donc guère étonnant de le voir apparaître ici. Si le quotidien se passe de cette notion de repère, c'est que dans la plupart des situations de la vie courante, parler de "la" vitesse revient à parler de la vitesse par rapport au sol. Le sol est donc un repère commun et naturel par rapport auquel tous les mouvements sont rapportés. Rien d'étonnant à ce qu'il disparaisse pour ne laisser subsister que la seule notion de la vitesse des objets. Mais alors, elle n'est plus repérée par rapport au sol ni à rien d'autre. Elle devient une propriété de l'objet, au même titre que sa masse, ou sa forme, une caractéristique intrinsèque qui est souvent marquée dans le vocabulaire par l'adjonction du terme propre : "la vitesse propre des lunettes, la vitesse propre du personnage qui marche".

b) Cette vitesse, propriété de l'objet, va évidemment poser certains problèmes lorsqu'on se demande ce que voient deux observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre. Différentes réponses sont possibles qui dépendent en partie de la formulation physique du problème.

1 - Une première solution est de s'en tenir à la vitesse propriété de l'objet. Dans ce cas, pour les deux observateurs, la vitesse est la même :

"A Q11, il y a chute libre, la vitesse des lunettes est la même à un instant donné".

"A Q11, les lunettes ont leur vitesse propre et c'est la même pour les deux parachutistes".

"Oui c'est la même pour les deux observateurs car les observateurs ont les moyens de mesurer correctement ce qu'ils voient".

"J'avais répondu comme si chaque para faisait son calcul".

2 - On voit poindre, dans les deux dernières citations, la distinction, elle aussi classique et habituelle, entre vitesse apparente et vitesse vraie. C'est cette dernière qu'une mesure correcte, un calcul permet d'obtenir. Mais si l'on veut essentiellement comparer ce que voient les deux observateurs, on s'en tient au

niveau de l'apparence :

"Quand deux objets se déplacent à vitesse différente mais constante, les objets qui les environnent leur apparaissent à des vitesses différentes".

"Un mouvement uniforme vu par plusieurs observateurs est apprécié de manière différente par chaque observateur".

Cette distinction ressurgit lors de la question : "A la réflexion, voyez-vous une relation qui puisse servir à vérifier la cohérence de vos réponses ?", un étudiant nous répond : "Oui, il y a une relation entre vitesse réelle et apparente".

Les étudiants oscillent entre ces deux comportements : vitesse, propriété de l'objet , intrinsèque, et deux vitesses, l'une étant vraie et l'autre apparente. Certaines situations physiques favorisent la reconnaissance de ces deux vitesses : ce sont les situations pour lesquelles les vitesses "vraies" d'un observateur et de l'objet sont nulles, l'autre observateur ayant une vitesse "vraie" différente de zéro. C'est le cas de l'exercice 3 lorsque l'objet est une affiche collée au mur.

"A est fixe, B est mobile et l'affiche immobile. Pour B, l'affiche va dans l'autre sens".

C'est également le cas des contre-exemples efficaces. Ne fallait-il pas que l'hélicoptère auquel se tenait le parachutiste fasse du sur place ?

Cette absence de "fixité" de l'un des observateurs est souvent un obstacle. En effet, un étudiant nous dit :

"Les deux paras sont liés à un mouvement qui est l'attraction terrestre qui les attire vers le bas, les vitesses des paras sont différentes mais l'une n'est pas nulle".

3 - Les situations d'entraînement permettent une composition simple. Il y a dans l'exercice du tapis roulant "deux vitesses", celle du personnage qui marche et celle du tapis :

"Il y a la vitesse du tapis et la vitesse de la personne C. Pour B, C a sa vitesse propre ; pour A, sa vitesse propre plus celle du tapis".

"B est entraîné par un mouvement C, aussi mais en plus il marche. Donc A (fixe) et B ne peuvent voir la même chose".

Ainsi avec ces situations d'entraînement, les étudiants arrivent à déconnecter les mouvements de l'objet dans les différents référentiels. Mais il ne faut pas perdre de vue que, ici comme dans les autres situations, il n'est jamais question de référentiel et que la composition n'est possible que par l'effet facilement observable de deux vitesses "vraies" (on notera que la vitesse vraie de C n'est pas celle par rapport à la terre mais par rapport au tapis roulant ; cependant, elle reste la vitesse, comme les autres).

b. Les trajets

Plus encore que la vitesse, la distance parcourue semble être une propriété intrinsèque du mouvement. Les arguments avancés à propos des vitesses restent valables : dans le quotidien, les distances parcourues sont presque toujours repérées par rapport au sol, de sorte qu'un repère n'apparaît pas plus nécessaire pour définir un trajet qu'une vitesse. Mais les problèmes se compliquent ici à cause de la confusion possible entre distance parcourue et longueur séparant deux points à un instant donné. En effet, ces deux grandeurs n'ont pas du tout les mêmes propriétés vis-à-vis des changements de repère. Qu'il y ait, en partie, identification de l'une à l'autre n'a rien de surprenant car, rien ne permet, dans le quotidien, de percevoir une différence dans leurs propriétés.

a) Le seul cas qui conduise à une reconnaissance assez claire de deux distances différentes est celui où il y a entraînement par le tapis roulant (exercice 3). C'est le seul exercice qui obtienne un fort pourcentage de bonnes réponses. Les justifications sont claires :

"La distance parcourue dépend de l'observateur. Pour B, la distance est celle d'une enjambée, pour A il s'agit de la longueur d'une enjambée plus la distance correspondant au trajet du tapis roulant pendant ce temps".

Etc.

Une certaine ambiguïté subsiste dans le vocabulaire bien que la réponse soit correcte : qu'est-ce que la longueur d'une enjambée ? est-ce la même chose que la distance parcourue en un pas ? ne s'agirait-il pas plutôt d'une longueur "intrinsèque", ne dépendant que de la morphologie du marcheur ? Pour un certain nombre d'étudiants, l'identification est complète et la distance parcourue devient indépendante de l'observateur, le tapis ne jouant plus aucun rôle. La correction de telles erreurs est assez difficile : il faut, par exemple, faire analyser la marche d'un individu C' qui tiendrait la main de C mais qui marcherait sur le sol tandis que C avance sur le tapis roulant. Faire apparaître que les "enjambées" de C et C' doivent être différentes n'est pas toujours élémentaire.

b) Dès lors qu'il n'y a plus de mécanisme d'entraînement, le caractère intrinsèque des distances parcourues s'impose. Ainsi, une mouche qui vole en permanence à la verticale de C parcourt la même distance pour les deux observateurs, même s'il n'en est pas de même pour C.

Le premier exercice (le poisson qui saute) va donner lieu aux mêmes remarques. Les différences entre Q3 et Q21 sont claires aux yeux des étudiants :

"A Q21, l'un des observateurs est entraîné par le tapis, l'autre immobile ; à Q3, le poisson est libre, aucun observateur n'a le même mouvement".

"Quand C fait un pas, il est entraîné en même temps que le tapis alors que le poisson fait simplement un saut, le courant ne joue pas".

"Le poisson fait un saut, ce qui veut dire qu'il n'est pas entraîné par le courant d'eau".

"Pour le poisson, on ne sait pas s'il monte ou descend le courant".

"Pour le poisson, est-il précisé que le poisson est dans le courant ?" - Non - "C'est une distance délimitée par deux points fixes parce qu'il n'y a pas de courant".

Cette dernière précision est d'importance : les points de départ et d'arrivée sont qualifiés de fixes et, par suite, la distance parcourue est égale à la longueur qui sépare ces deux points fixes.

Il y a donc une identification au plan des propriétés et donc des réponses fournies entre les grandeurs longueur qui sépare deux points fixes (ou plutôt fixes l'un par rapport à l'autre) et distance parcourue pendant un certain temps.

Lorsque nous disons identification de ces trois distances, il est clair qu'il s'agit d'une identification des réponses fournies, les étudiants sachant distinguer les questions portant sur les longueurs de celles portant sur les trajets : en d'autres termes, ils ne confondent pas toutes ces distances bien qu'elles aient les mêmes propriétés vis-à-vis des changements de repère.

Ce comportement n'est guère surprenant car ces notions sont rarement définies dans l'enseignement : il faut attendre l'étude de la relativité restreinte pour voir apparaître des définitions claires de ces notions.

Ce comportement est d'autant plus fréquent que les points de départ et d'arrivée sont matérialisés - ce qui n'est pas le cas lors du saut du poisson. C'est donc à la question sur les lunettes que l'on va trouver le plus de réponses fausses. L'explication, là aussi, est claire :

"A Q9, la vitesse des paras est constante mais différente. L'intervalle entre paras ne reste pas constant mais la hauteur est la même. Elles tombent d'une certaine distance fixe qui est la même pour les deux".

On aura noté au passage que le langage courant, tout comme celui du physicien, ne distingue pas clairement les deux notions de longueur instantanée et de distance parcourue. Le texte lui-même parle de longueur du poisson et de longueur du saut du poisson. De même pour les lunettes, on employait d'abord le terme de "hauteur" de chute des lunettes qui prête à confusion. Mais on obtient les mêmes réponses en parlant de "distance parcourue" par les lunettes durant leur chute ou de distance parcourue par le poisson durant son saut. Le vocabulaire essentiellement interchangeable traduit une identification profonde des propriétés de ces grandeurs, les concepts eux-mêmes n'étant pas pour autant reconnus identiques.

Des situations équivalentes conduisent aux mêmes réponses :

a) Lors du contre-exemple pour lequel un nageur envoie un ballon à l'autre, 5 étudiants sur les 7 qui ont eu ce contre-exemple déclarent que la distance parcourue par le ballon est la même pour les deux nageurs car : "c'est la distance entre les deux nageurs".

b) Lors du test "vedette", 71 % des étudiants répondent que la distance parcourue par la vedette durant sa manoeuvre est la même pour les deux marins (161 étudiants avaient passé ce test). Là aussi, les justifications aboutissent toutes à la même conclusion :

"la distance parcourue est la même mais ce n'est pas obligatoirement celle qui sépare les deux bateaux car les vitesses respectives des deux marins ne sont pas les mêmes".

"Le trajet de la vedette est indépendant de la position des deux marins".

"La distance pour aller d'un point à un autre est la même".

Le point essentiel est la matérialisation des points de départ et d'arrivée. Les étudiants sont d'accord pour dire que la distance entre points de départ et d'arrivée dépend du temps mais, à une question sur les trajets, le temps s'efface et il ne reste plus que des positions intemporelles.

c) Il est bien sûr possible de combiner entraînement et matérialisation des points de départ et d'arrivée. Par exemple J_1 et J_2 sont deux personnages accoudés à la rampe du tapis roulant (cf. fig. 1). Lorsqu'on demande aux quatre étudiants qui sont arrivés à cette partie du questionnaire si la distance parcourue par C pour aller de J_1 à J_2 est la même ou différente pour A et B, tous donnent la même réponse :

"Oui, car la distance entre J_1 et J_2 est la même pour A et B", alors qu'ils ont répondu correctement à Q23.

Dès qu'il y a conflit possible entre caractère intrinsèque des distances-longueurs et effet de l'entraînement, c'est le premier qui l'emporte. Nous reviendrons plus loin sur l'importance pédagogique de ce point.

CHAPITRE II

MATERIEL EXPERIMENTAL

I. TECHNIQUES EXPERIMENTALES

A. PROCEDURES METHODOLOGIQUES

1) Généralités

Les résultats de l'enquête préliminaire montrent que la plupart des étudiants ont un comportement différent de celui du physicien lorsqu'ils doivent manipuler des grandeurs physiques apparaissant dans un contexte concret. En effet le refus fréquent des analogies entre exercices formellement identiques, la non-utilisation de la relation $v = d/t$, pourtant bien connue d'eux, montrent que les étudiants ne se réfèrent pas tout d'abord à une grandeur physique en tant que concept formel. Par ailleurs, les résultats sur la vitesse indiquent que celle-ci devient une propriété intrinsèque de l'objet et que sa définition est très éloignée de celle du physicien. Ce comportement est-il dû à la forme de l'enquête ou à une compréhension incomplète de la physique ? Afin de répondre à cette question, il nous faut connaître la façon dont l'étudiant s'y prend pour résoudre un exercice, c'est-à-dire connaître d'une part la nature des caractéristiques de la situation physique étudiée et des éléments contenus dans l'énoncé qui lui servent de point de départ dans son raisonnement, d'autre part la façon dont ces éléments et ces caractéristiques interviennent dans la solution qu'il donne. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de ne poser qu'un seul exercice (et non trois) à chaque étudiant et de ne l'interroger que sur un nombre limité de concepts.

Ainsi, à partir d'un schéma d'exercice correspondant à une situation physique donnée, nous avons bâti plusieurs tests qui traitent du même problème mais qui diffèrent entre eux soit par la

présentation, soit par le nombre ou la nature des éléments contenus dans l'énoncé. L'ensemble de ces tests constitue le matériel expérimental d'une expérience qui a des objectifs de recherche spécifiques et limités. La confrontation des résultats des tests d'une même expérience permet d'isoler certains comportements qui se retrouvent tout au long des réponses. Bien sûr, chaque étudiant pris individuellement suit un cheminement propre ; mais nous avons essayé de dégager des processus de raisonnement communs à l'ensemble des étudiants.

Cependant une seule expérience n'est pas suffisante car les processus dégagés peuvent être ou non spécifiques de la situation physique étudiée. Pour savoir s'ils sont généralisables à d'autres situations, il est nécessaire d'étudier plusieurs situations physiques différentes et de bâtir plusieurs expériences. Là encore, c'est la confrontation de l'ensemble des résultats qui permettra de dégager des processus de raisonnement généraux.

Trois expériences ont été réalisées : nous les décrirons en détail en indiquant à chaque fois ce que nous attendions d'elles avant d'en donner les résultats.

2) Construction des tests

Nous avons choisi de présenter les exercices de façon qualitative en donnant un minimum de chiffres (le plus souvent aucun) et de notations (souvent aucune) afin que l'étudiant ne soit pas incité à utiliser des formules apprises par coeur mais pas forcément comprises. Dans les exercices traditionnels, c'est la méthode inverse qui est utilisée : dans un très grand nombre de cas, ces exercices ne mesurent que l'aptitude de l'étudiant à appliquer une formule et ne permettent pas de savoir si la physique de l'exercice est comprise. Quand on donne, dans un énoncé, la vitesse \vec{v}_A d'un mobile, la vitesse d'entraînement \vec{v}_e et que l'on demande la vitesse relative \vec{v}_R de ce mobile, il est facile d'appliquer la formule bien connue : $\vec{v}_A = \vec{v}_R + \vec{v}_e$ pour trouver \vec{v}_R ; mais rien ne permet de dire que l'étudiant a compris ce que représentent ces vitesses et pourquoi elles sont reliées entre elles de cette façon.

Ce phénomène est du reste très général en physique. On utilise des notations relativement universelles : v pour la vitesse, γ pour l'accélération, t pour le temps, etc. On écrit les relations toujours de la même façon : $v = d/t$, $F = m\gamma$ et non pas $t = d/v$, $\gamma = F/m$ qui sont pourtant déduites des précédentes. Il est évident que sans notations cohérentes et systématiques on ne pourrait tenir de discours compréhensible et que la forme des relations, l'ordre dans lequel s'énoncent les divers termes sont essentiels pour assurer une mémorisation rapide et efficace. Mais il est parfaitement possible d'utiliser de façon purement formelle ces symboles sans s'occuper de savoir ce qu'ils désignent. D'où toute une série de difficultés bien connues (application mécanique des formules, difficultés à changer de notation, à énoncer avec des mots et phrases une relation, confusions entre grandeurs notées de la même façon, etc.) qui mériteraient une analyse plus approfondie. Nous voulons simplement retenir de ce qui précède que l'emploi correct d'une formule ne signifie pas automatiquement qu'elle est comprise. Mieux vaut donc si l'on s'intéresse exclusivement au problème de la compréhension s'affranchir du problème des symboles et éviter que des automatismes ne cachent les incompréhensions et les difficultés.

Avec des exercices qualitatifs, l'étudiant ne peut plus se raccrocher à des formules "miracles" ou "réflexes", l'énoncé ne contenant en général aucune notation. L'utilisation d'une relation reste possible, mais l'étudiant doit alors associer des notations qu'il connaît par ailleurs à des éléments verbaux contenus dans l'énoncé, ce qui est bien différent d'une manipulation algébrique ou numérique de notations ou de chiffres qu'on lui a fournis. Ainsi si l'étudiant applique une formule, il lui faut en connaître sa signification et son domaine d'application.

Cette façon de présenter un exercice présente l'avantage de mieux mettre en évidence comment l'étudiant s'y prend pour résoudre le problème posé : quels sont les éléments de l'énoncé qui lui servent de point de départ, comment les utilise-t-il, quelle place réserve-t-il au modèle formel dans son raisonnement...?

Cependant un test unique ne peut permettre de répondre à toutes ces questions. C'est en faisant varier certains éléments contenus dans l'énoncé que l'on peut, au vu des résultats obtenus, en déduire leur importance. Par exemple, y aura-t-il des différences de comportement lorsque les mobiles sont des bateaux naviguant sur l'eau ou de simples mobiles abstraits ? Le caractère concret ou abstrait des mobiles est-il un paramètre important ? Si oui, pourquoi ?

3) Nature des tests

Tous les exercices ont été posés aux étudiants sous forme de tests papier-crayon. Nous avons abandonné, sauf pour les étudiants littéraires, la technique de l'entretien individuel. En effet, ayant repéré certaines difficultés lors de l'enquête préliminaire, il est possible de bâtir des tests ayant pour fonction de rechercher des informations sur des situations physiques spécifiques et un nombre limité de concepts.

La technique du test papier-crayon est alors plus avantageuse car elle permet de toucher un plus grand nombre d'étudiants en un temps beaucoup plus court. Parallèlement, l'anonymat de ces tests permet sans doute à certains de s'exprimer plus librement, d'autant plus facilement que chaque étudiant ne se retrouve pas seul devant un interrogateur mais dans une salle de travaux dirigés au milieu de ses camarades. Enfin ces tests sont plus facilement manipulables que des bandes magnétiques.

4) Déroulement des tests

Chaque test est prévu pour une durée de vingt à trente minutes. Au préalable, nous expliquons aux étudiants ce que nous attendons de ces tests et d'eux-mêmes, c'est-à-dire :

- comment ils comprennent le texte, ce qui implique de leur part de préciser sur leur feuille-réponse les parties du texte ou les questions qui leur paraissent ambiguës et, si possible, pourquoi ;

- comment, à partir de cette compréhension, ils arrivent à une réponse plus ou moins complète. Ceci implique pour eux de ne pas être gênés par une réponse qui leur paraît évidente, d'essayer de la justifier (même si cela consiste à dire : "parce que je suis convaincu"), de laisser apparentes leurs corrections successives et, enfin, de ne pas être gênés par une réponse incomplète.

Nous avons ainsi essayé de leur faire comprendre que nous ne cherchions pas la "bonne réponse", mais une réponse accompagnée, si possible, des éléments qui les y ont menés.

L'étudiant est souvent dérouté, au départ, par la forme du test : durant quelques minutes, il reste perplexe, sans très bien comprendre ce qu'on lui demande. L'énoncé ne comporte aucun chiffre, aucune notation : comment faire pour trouver une réponse ? En général, le comportement de chacun change rapidement (peut-être parce que ce genre d'activité est inhabituel), les formes des tests sont acceptées et les règles du jeu comprises.

Quel n'a pas été notre étonnement d'assister à des discussions passionnées et souvent orageuses, chacun maintenant, dans la plupart des cas, son point de vue initial et cherchant à convaincre ses camarades. De la même façon, nous avons été surpris par le comportement des étudiants littéraires avec qui nous avons eu des entretiens individuels : là aussi, ils défendaient leur point de vue avec obstination et énergie.

B. POPULATION INTERROGEE

Trois recherches différentes et donc trois expériences différentes ont été entreprises, chacune comportant un certain nombre de tests et chaque étudiant ne passant qu'un seul test.

Afin de savoir si les résultats dépendent de la formation de l'étudiant et, en particulier, de son niveau d'études, nous avons

interrogé des sujets de niveau et de formation différente.

Au total, 635 adultes ont été interrogés selon la répartition suivante :

Nom de l'expérience	Public interrogé
"Dépassement"	234 étudiants de 1ère année*
"Rivière"	172 étudiants de 1ère année*
	183 étudiants de 2ème année
	11 étudiants littéraires
"Caillou"	87 étudiants de 1ère année.

Exceptés les étudiants littéraires (Institut Charles V, Paris VII) avec qui nous avons eu des entretiens individuels, tous les étudiants ont eu des tests papier-crayon et sont en première ou deuxième année d'université (Paris VI, Paris VII, D.E.U.G., S.S.M.).

C. DEPOUILLEMENT DES TESTS : MODE D'ANALYSE

Les exercices qualitatifs ont un inconvénient : l'imprécision de certaines données, le caractère réaliste de l'énoncé peuvent conduire l'étudiant à compliquer le problème posé. On n'est jamais certain que l'étudiant comprend l'énoncé comme on le souhaiterait et donc que des ambiguïtés, involontaires de notre part, ne subsistent pas. Aussi faut-il être très prudent dans l'analyse des réponses. On peut se trouver dans la situation selon laquelle l'énoncé est compris par l'étudiant comme on le souhaite à l'occasion d'une question alors qu'il est déclaré ambigu à l'occasion de la question suivante. Il faut, dans ce cas, avant d'en déduire que cette ambiguïté est le fait de l'étudiant, confronté sans doute à des contradictions qu'il ne sait pas surmonter, s'assurer que l'énoncé n'est pas à l'origine de cette ambiguïté.

* Etudiants n'ayant pas encore étudié la cinématique ou étant en train de l'étudier.

Le matériel expérimental est constitué de plusieurs éléments différents :

a) Nous disposons de résultats chiffrés de deux types :

1 - Lorsque l'étudiant doit répondre par oui ou par non à des questions (cf. enquête préliminaire), on peut aisément en déduire des pourcentages d'échec et de réussite. Le problème est de savoir si ces pourcentages sont significatifs. En effet, lorsque l'étudiant n'a que deux choix pour répondre, il peut parfois répondre au hasard en tirant à pile ou face. Des pourcentages faibles peuvent, a priori, ne pas être significatifs. Cependant, nous verrons lors de l'analyse des résultats que même des pourcentages faibles ont un sens et qu'ils ne correspondent pas à des réponses données au hasard.

2 - Lorsque l'étudiant doit tracer une trajectoire, on peut encore aboutir à des résultats chiffrés, il suffit de classer, par exemple, ces trajectoires par leur forme. Ces résultats ne sont plus tout à fait de même nature que les précédents. En effet, il est difficile d'admettre que l'étudiant a tracé une trajectoire en utilisant une pièce de monnaie ! Les réponses au hasard sont donc peu probables. La forme de la trajectoire n'est pas neutre et les pourcentages (si petits soient-ils) sont révélateurs de certains processus de raisonnement.

Ces deux types de résultats chiffrés, pris isolément, ne permettent pas de savoir pourquoi l'étudiant a choisi une réponse plutôt qu'une autre et comment il est arrivé à une réponse. Dans un premier temps, ils permettent d'établir un catalogue de questions-réponses.

Puis, lorsque l'expérimentateur pense avoir réussi à comprendre une partie de la physique estudiantine, il peut construire des tests qui ont pour but essentiel d'isoler au maximum un type de comportement. Dans ce cas, ces pourcentages sont des éléments qui

servent à confirmer les hypothèses de départ. Ces derniers tests, isolés de leur contexte, peuvent être considérés par certains comme des pièges si les résultats sont "mauvais" et sans intérêt (car trop faciles) si les résultats sont "bons". Ils n'ont, pour nous, que valeur de confirmation d'hypothèses construites dans des contextes peu classiques et ne doivent pas être détachés de ces contextes.

3 - Il reste les textes libres, c'est-à-dire les commentaires écrits ou oraux, tous assez brefs.

Nous n'avons pas cherché à déployer, pour les analyser, d'outils techniques perfectionnés, ni même d'analyse systématique par grilles de "mots clés", etc... Ce genre d'analyse permet d'obtenir des renseignements, en particulier statistiques, intéressants mais est très lourde et délicate à mettre en oeuvre, et suppose toujours une analyse qualitative préalable des textes concernés. Nous avons limité notre étude à ce niveau qualitatif. On peut le considérer comme peu systématique, approximatif ou même déformant à cause des choix et interprétation que ce type d'analyse risque d'introduire dans les textes. Mais on peut, à moindres frais, mettre ainsi en évidence de nombreux problèmes. Et si une étude plus systématique risquait d'être plus convaincante au niveau des chiffres, nous ne sommes pas sûrs qu'il en sortirait, en tout cas dans le cadre qu'on a fixé à ce travail, d'idées nouvelles. Laissons le lecteur juger, à travers l'usage que nous ferons de ces textes dans la suite, si le mieux aurait été ou non l'ennemi du bien.

II. EXPERIENCE DEPASSEMENT

A. DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE

1. Généralités

Lors de l'enquête préliminaire, nous avons constaté que les étudiants différenciaient les notions de longueur d'un objet et de trajet tout en leur attribuant les mêmes propriétés vis-à-vis des changements de référentiels. Avec cette expérience, nous avons cherché à savoir comment ils différenciaient les trajets des distances instantanées entre deux mobiles.

Rappelons ce que nous entendons par trajet, longueur ou distance instantanée.

Un trajet est la distance parcourue par un mobile pendant un certain intervalle de temps. Mesurer un trajet, dans un référentiel donné, nécessite de noter les positions de ce mobile à deux instants différents dans ce référentiel : un trajet n'est pas un invariant galiléen.

En revanche, toute longueur est un invariant galiléen, car il s'agit d'une distance qui sépare deux points (qui n'appartiennent pas forcément au même mobile), dont les positions sont mesurées au même instant dans chaque référentiel. Ainsi, ce terme de longueur ou de distance instantanée englobe :

- la longueur d'un objet rigide (longueur d'une voiture, par exemple). Cette distance ne dépend pas de l'instant où l'on fait la mesure ;
- la longueur d'un objet non rigide (longueur d'un ressort en

mouvement par exemple). Cette "longueur" matérialisée varie donc en fonction du temps, tout en représentant une caractéristique d'un seul objet ;

- la distance instantanée qui sépare deux mobiles en mouvement (par exemple deux voitures). Cette distance dépend aussi de l'instant où l'on fait la mesure mais n'est plus une caractéristique d'un seul objet matériel.

2. Nature de l'expérience

Nous sommes partis d'une situation classique de dépassement (d'où le nom de l'expérience). Deux mobiles "a" et "b" suivent pratiquement la même route rectiligne. Pour un observateur (au sens du physicien), O_1 , le mobile "a", se trouve, à un instant T, derrière le mobile "b". La situation à l'instant T' est inversée, le mobile "b" étant derrière "a". Ces deux événements sont décrits par l'observateur O_1 qui rend compte des positions des deux mobiles aux instants T et T' dans son propre référentiel. Ce compte-rendu du dépassement, établi par O_1 , est considéré dans la suite comme le compte-rendu de référence.

On propose ensuite à l'étudiant sept compte-rendus fournis par sept observateurs en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre. L'étudiant doit nous indiquer si chaque compte-rendu est compatible ou non avec le compte-rendu de référence ; il doit, en outre, justifier à chaque fois sa réponse et tenter, enfin, de dégager une règle générale qui permette de répondre à l'ensemble des compte-rendus.

3. Nature des tests

A partir de ce schéma général d'exercice, quatre tests ont été construits, pour lesquels nous avons fait varier deux paramètres :

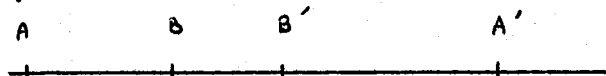
a) l'un concerne l'habillage de l'énoncé : l'énoncé "abstrait" (A) parle de mouvements de mobiles dans des repères différents ; dans

l'énoncé "concret" (C), les mobiles sont remplacés par des bateaux et les observateurs sont les radios ou les commandants de bateaux naviguant sur la même route maritime.

Avec ces tests, la description des événements est la même, seule la "nature" des mobiles et des observateurs change : les étudiants réagiront-ils de la même façon ? Auront-ils tendance à faire des calculs avec l'énoncé "abstrait" ? Le caractère réaliste de l'énoncé concret les incitera-t-il à opérer autrement ?

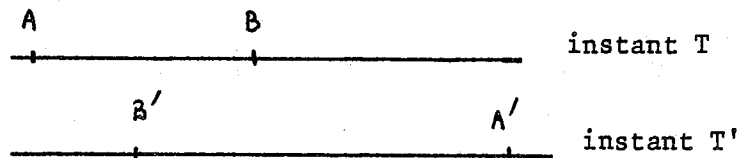
Le choix de bateaux naviguant sur la mer n'est pas différent : en principe, la distance entre deux bateaux à un instant donné ne peut pas être matérialisée par la distance qui sépare deux arbres ou deux bornes kilométriques, comme le serait celle entre deux voitures roulant sur une route. De la même façon, la distance parcourue par un bateau en plein océan ne peut pas être matérialisée par la distance qui sépare deux bouées.

b) L'autre concerne la description des événements. Avec la version dite "mouvement", on donne une description de ces événements qui permet de les relier entre eux et d'en déduire, dans chaque référentiel, le détail des mouvements. En effet, chaque observateur représente les positions successives des deux mobiles par un schéma unique du type :



On peut déduire de tels schémas, dans chaque référentiel, la vitesse de chacun des mobiles, la distance parcourue par chacun et, si l'on admet que les observateurs étaient à un instant origine au même endroit, passer d'un référentiel à l'autre. Ceci étant, on peut aussi en déduire les distances qui séparent les deux mobiles aux deux instants considérés. Le problème est de savoir sur quelle grandeur physique l'étudiant portera son attention et quelles en seront les conséquences.

Avec la version dite "position", les positions relatives des deux mobiles sont également données aux instants T et T' , mais sans qu'il soit possible de relier celles-ci entre elles : en effet, on donne alors le schéma suivant :



On ne peut donc en déduire autre chose que ce fait : "l'un des mobiles, durant cet intervalle de temps, a dépassé l'autre". Cette description a tendance à effacer le mouvement des mobiles entre les deux instants considérés et à focaliser l'attention de l'étudiant sur les distances instantanées.

Quatre tests ont été ainsi bâtis :

- deux tests "mouvement", l'un "abstrait", l'autre "concret". Les schémas proposés sont les mêmes pour ces deux tests ;
- deux tests "position", l'un "abstrait", l'autre "concret". La présentation des événements diffère légèrement d'un test à l'autre. En effet, chaque compte-rendu du test "position-abstrait" est constitué de deux schémas (l'un à l'instant T , l'autre à l'instant T') qui ne peuvent être reliés entre eux. Le test "position-concret" est le seul qui fournisse des données numériques. A partir de ces données, on peut évidemment reconstruire aussi bien les schémas des tests "mouvement" que ceux du test "position-abstrait", cependant, dans l'énoncé, les deux instants T et T' sont séparés. Cela induira-t-il des schémas du type de ceux du test "position-abstrait" ? Sinon pourquoi ?

Remarquons enfin que pour résoudre le problème posé, il suffit de savoir que les distances algébriques instantanées entre deux mobiles sont invariantes par changement de référentiel et de vérifier cette invariance pour chacun des compte-rendus. Il est inutile de savoir si les mouvements des mobiles dans les différents référentiels sont uniformes ou non ; aucune information sur "les vitesses" des mobiles et des observateurs n'est donc nécessaire :

c'est pourquoi les énoncés se contentent d'indiquer que les vitesses sont colinéaires et différentes.

4. Enoncé des tests

Test "position-concret" (P.C)

"Nous naviguons plein sud. Il y a trois heures, à 15 h, en sortant sur le pont, j'ai vu un cargo à 3 milles derrière et un dragueur à notre niveau. Maintenant, à 18 h, le dragueur est à 2 milles devant et le cargo déjà à 7 milles devant". (Nous sommes sur une voie maritime très fréquentée où tous les bateaux suivent pratiquement la même route rectiligne).

Par radio, un autre bateau répond :

"Moi aussi, je les ai vus, mais :

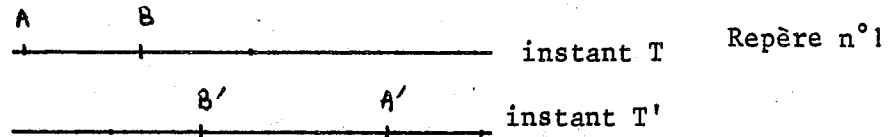
		à 15 heures	
		le cargo était à :	et le dragueur à :
	2	2 milles au sud	5 milles au sud
	3	1 mille S	4 milles S
	4	4 mille S	7 milles S
	5	Niveau	3 milles S
	6	4 milles N	1 mille N
	7	Niveau	3 milles S
	8	Niveau	3 milles S
		maintenant, à 18 heures	
		le cargo est à :	et le dragueur à :
	2	2 milles au nord	3 milles au sud
	3	6 milles S	1 mille S
	4	3 milles S	2 milles N
	5	3 milles S	1 mille N
	6	8 milles S	2 milles S
	7	7 milles S	2 milles S
	8	1 mille S	4 milles N

Certaines de ces réponses provoqueraient chez notre premier marin, très intelligent, un hochement de tête significatif : "il y en a qui ne supportent pas la solitude en mer", penserait-il. Ces réponses correspondent en effet à une perception de la situation décrite en I, qui n'est compatible avec la réalité que moyennant une forte dose de boissons alcoolisées. Dites lesquelles en précisant vos raisons dans chaque cas. Tentez de trouver une règle générale qui permet de répondre à ces questions.

Test "position-abstrait" (P.A)

On observe dans un repère n°1 deux mobiles a et b animés de vitesses différentes et colinéaires. A l'instant T, a et b coïncident

respectivement avec les points A et B du repère ; à l'instant T' ils coïncident avec A' et B'. On peut représenter leurs positions par le schéma ci-dessous :



On représente maintenant cette même suite d'évènements (positions des mobiles a et b aux instants T et T') observés dans d'autres repères en mouvement par rapport au repère n°1, mais ayant tous la même unité de longueur que le repère n°1.

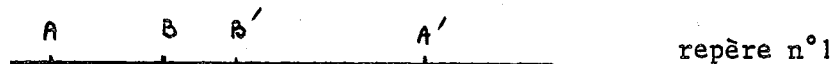
Suivent 7 schémas équivalents correspondant aux sept observations faites dans sept repères différents...

Parmi ces schémas, certains sont impossibles. Dites lesquels, en précisant vos raisons dans chaque cas. Tenter de dégager une règle générale...

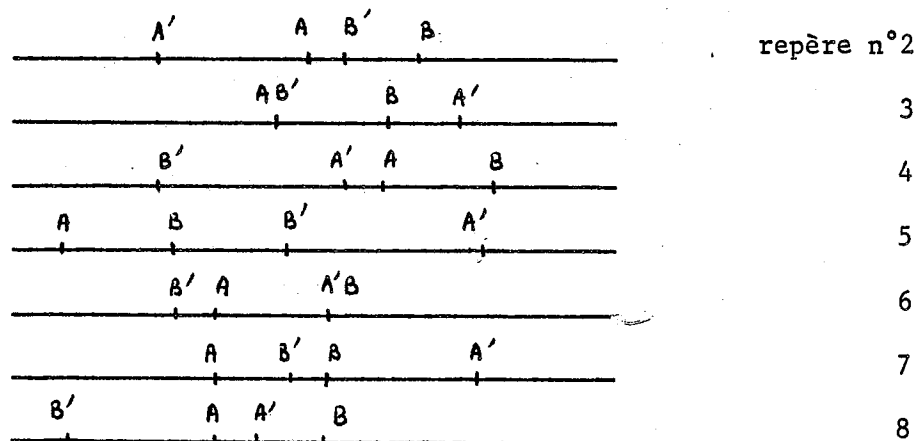
Test "Mouvement-abstrait" (M.A)

On observe dans un repère (n°1) deux mobiles a et b animés de vitesses différentes et colinéaires.

A l'instant T, a et b coïncident respectivement avec les points A et B du repère ; à l'instant T', ils coïncident avec A' et B', de sorte que l'on peut représenter leurs positions successives par le schéma ci-dessous.



On représente maintenant cette même suite d'évènements (positions des mobiles a et b aux instants T et T'), observés dans d'autres repères, ayant tous même unité de longueur que le repère n°1. On obtient alors les configurations suivantes :



Parmi ces schémas, certains sont impossibles. Dites lesquels, en précisant vos raisons dans chaque cas et tentez de dégager, si c'est possible, une règle générale qui permette de répondre à l'ensemble des configurations.

Test "Mouvement-concret" (M.C)

C'est le même que le test M.A mais les observations sont faites par les commandants de différents bateaux, chacun notant les positions des 2 bateaux a et b. Il est aussi spécifié que les bateaux suivent pratiquement la même route maritime.

5. Population interrogée

Ces quatre tests ont été posés à des étudiants de première année d'université, n'ayant encore reçu aucun enseignement sur les changements de référentiels. La répartition est la suivante :

- test "position-concret" noté P.C	51 étudiants
- test "position-abstrait" noté P.A	45 "
- test "mouvement-concret" noté M.C.....	40 "
- test "mouvement-abstrait" noté M.A	57 "

B. RESULTATS BRUTS

a) Réponses concernant les compte-rendus

Seuls quatre compte-rendus (n°3, 4, 7 et 8) sont compatibles avec la situation proposée. Pour le compte-rendu n°2, le mobile "a" n'a pas dépassé "b" ; pour les n° 5 et 6, la distance entre les mobiles après le dépassement (instant T') n'a pas été conservée par le changement de référentiel.

Le tableau I rend compte des résultats obtenus.

Il apparaît que les tests "position", qu'ils soient abstraits ou concrets, suscitent de meilleures réponses que les tests "mouvement".

Le pourcentage de réponses justes à l'un quelconque des compte-rendus est, en moyenne, de 85 % pour les tests "position" et de 42 % pour les tests "mouvement".

Si, pour chacun des 4 tests, on s'intéresse uniquement aux réponses correctes à la totalité des sept compte-rendus, on observe une variation importante d'un test à l'autre : 86 % pour le test PC, 51 % pour le test PA, 2 % pour le test MC et 7 % pour le test MA.

La présentation d'un exercice est loin d'être neutre, les taux de réponses correctes variant énormément d'un test à l'autre. Les quatre variations construites à partir d'un schéma unique d'exercice ne sont pas du tout équivalentes pour l'étudiant : cela revient à avoir posé quatre exercices différents.

b) Nature des justifications

La quasi-totalité des étudiants justifient leurs réponses. A cet égard, trois types de comportements sont observés :

- . Certains n'ont besoin que d'un seul critère pour comparer les compte-rendus et donnent des réponses compatibles avec le critère explicité (qu'ils aient répondu à tous les compte-rendus ou seulement à quelques-uns). Nous les appellerons "étudiants cohérents".

- . D'autres utilisent soit des critères différents d'un compte-rendu à l'autre, soit un seul critère mais leurs réponses sont alors incompatibles avec ce critère. Nous les appellerons "étudiants incohérents".

- . D'autres enfin ne donnent aucune justification.

Le tableau II indique comment les étudiants se répartissent dans ces trois catégories.

Tableau I

Les résultats sont donnés en %

N° du compte-rendu	Réponses	Test PC (N = 51)	Test PA (N = 45)	Test MC (N = 40)	Test MA (N = 57)	Réponses compatibles avec le critère sens des déplacements
2	(I) P rien	96 2 2	65 31 4	33 67 0	50 44 6	I (sens intrinsèque) P (sens relatif)
3	I (P) rien	2 96 2	11 80 9	75 21 4	56 36 8	I
4	I (P) rien	4 94 2	13 80 7	33 60 7	36 47 17	I (sens intrinsèque) P (sens relatif)
5	(I) P rien	92 4 4	87 9 4	21 75 4	35 53 12	P
6	(I) P rien	88 6 6	73 18 9	88 8 4	77 7 16	I
7	I (P) rien	6 88 6	19 72 9	73 20 7	23 57 20	I
8	I (P) rien	6 86 8	15 72 13	75 16 9	49 35 16	I

I = impossible ; P = possible. ○ réponses compatibles avec le critère distance à un instant donné (en valeur algébrique).

Tableau II

	PC	PA	MC	MA
	(en pourcentage)			
Etudiants cohérents	94	91	70	25
Etudiants incohérents	6	7	30	72
Aucune justification	0	2	0	3

Les quatre critères les plus fréquemment utilisés sont :

- . la distance entre les deux mobiles à un instant donné (module ou valeur algébrique)
- . la distance parcourue par chacun des mobiles
- . l'ordre des mobiles. Dans ce cas, l'étudiant ne tient compte que du dépassement de "a" par "b", sans s'intéresser aux vitesses des mobiles ni aux distances entre les mobiles
- . le sens des déplacements des mobiles. Celui-ci peut être soit intrinsèque (chacun des deux mobiles doit toujours se diriger vers la droite comme sur le schéma initial), soit relatif : sont alors acceptés les schémas sur lesquels les deux mobiles se dirigent vers la droite ou vers la gauche, à condition qu'ils se déplacent tous les deux dans le même sens.

Le tableau III indique la répartition des étudiants cohérents en fonction du critère choisi. Rappelons que certains de ces étudiants n'ont pas répondu à tous les compte-rendus.

Tableau III

	PC	PA (en pourcentage)	MC	MA
Distance à t donné				
. module	0)	22)	0)	7)
. valeur algébrique	90) 90 %	51) 73 %	5) 5 %	12) 19 %
Distance parcourue		7 %	7,5 %	3,5
Ordre des mobiles	2 %	2 %	7,5 %	0
Sens des déplacements				
. intrinsèque	2)	0)	7,5)	0)
. relatif	0) 2 %	9) 9 %	42,5) 50 %	2,5) 2,5 %

c) Règles générales

Les étudiants répondant à cette question se rencontrent uniquement parmi les étudiants cohérents. Tous ne répondent pas à cette question.

Les règles fournies sont de trois types :

- La réécriture du critère utilisé : par exemple

"il faut $|\vec{AB}| = -3$ et $|\vec{A'B'}| = +5$ "

"il faut $|\vec{A'B'}|_i = |\vec{A'B'}|_1$ et B' doit se trouver avant A' ".

- La réécriture du critère utilisé accompagné d'une justification. Par exemple :

"AB doit rester constant car la vitesse est constante ainsi que T'-T".

- L'expression d'une loi générale qui serait valable pour toute autre situation physique de changement de repère que celle qui a été proposée. Par exemple :

"Quel que soit l'endroit où l'on se place, la distance entre deux points est la même".

"Quel que soit le repère choisi, la distance algébrique entre deux points est constante".

"Le changement de repère ne change pas le sens de déplacement de deux objets l'un par rapport à l'autre".

Donner une règle générale ne signifie pas pour autant qu'elle soit correcte : nous en verrons quelques exemples au cours de la discussion des résultats ; cependant, nous n'étudierons pas ici cet aspect de la question. Rappelons que seuls les étudiants cohérents donnent une règle générale : le tableau IV indique comment ils se répartissent.

Tableau IV

	PC	PA	MC	MA
Nombre de règles	74 %	49 %	71 %	64 %
Aucune règle	26 %	41 %	29 %	36 %

Pour ces quatre tests, les pourcentages d'étudiants donnant une règle par rapport au nombre d'étudiants cohérents varient peu d'un test à l'autre, avec cependant une différence entre les tests "abstrait" et "concret".

Pour chacun des étudiants de ces quatre tests, deux types de démarche sont possibles :

- trouver un critère commun permettant de répondre aux compte-rendus, puis tenter de se dégager de ce problème particulier afin d'énoncer une règle générale permettant ensuite de résoudre tous les problèmes similaires ;
- partir d'une règle générale (ici la loi d'invariance des distances à un instant donné) et l'appliquer au problème posé.

L'ordre des questions incite fortement l'étudiant à utiliser la première démarche : rien d'étonnant donc que l'ensemble des étudiants cohérents ait opéré de cette façon. Notons cependant qu'un étudiant (sur 193) a suivi la démarche inverse en partant de l'invariance des longueurs. Il serait hasardeux d'en tirer des conclusions générales sur le degré d'abstraction des étudiants, compte tenu de la forme des tests posés.

C. ETUDE DES JUSTIFICATIONS ET DES RESULTATS BRUTS

1.) Comparaison des tests "mouvement-abstrait" et "mouvement-concret"

Dans les deux tests "mouvement", les schémas proposés sont identiques, seul l'habillage diffère d'un test à l'autre. Le nombre d'étudiants cohérents (étudiants ayant utilisé un seul critère et donnant des réponses compatibles avec ce critère) varie beaucoup d'un test à l'autre : 70 % pour le test MC contre 25 % pour le test MA. Pour le test MC, trois étudiants cohérents sur quatre choisissent comme critère le sens des déplacements, alors que pour le test MA, c'est surtout la distance instantanée (algébrique ou module) qui est retenue (78 % des étudiants cohérents).

Si on s'intéresse maintenant aux justifications et aux règles générales, on constate avec le test MC que le sens des déplacements est celui du sens des mouvements des bateaux. C'est sous cette forme qu'il apparaît dans les justifications d'un étudiant sur deux et dans 12 règles générales sur 17. On lit, par exemple :

- "tous les schémas possibles sont ceux où les bateaux a et b vont dans le même sens, c'est-à-dire où ils ne se croisent pas"
- "les bateaux doivent aller dans le même sens"
- "un changement de repère n'influe pas sur le sens de déplacement"
- "les vitesses doivent avoir le même signe car, dans R_1 , elles ont même signe".

Avec le test MA, le critère unique choisi par les étudiants cohérents est une caractéristique géométrique du mouvement : pour 19 % des étudiants, c'est la distance instantanée (1/3 n'a considéré que le module de cette distance), 3,5 % la distance parcourue et 2,5 % le sens des déplacements (sens toujours relatif et jamais intrinsèque). Quant aux étudiants incohérents (ils sont nombreux : 72 %), ils donnent presque tous des réponses compatibles avec le seul critère sens des déplacements (sauf pour le compte-rendu n°7 qui semble avoir un statut à part). Ce sens des déplacements n'est plus, cette fois, celui des mouvements des mobiles, mais est lié à l'ordre des points de départ et d'arrivée. En effet, on trouve :

- le compte-rendu n°3 est impossible car :
"B' est à droite de B alors que A' est à gauche de A" ;
- le compte-rendu n°4 est impossible car :
"ayant ABB'A' dans I, on devrait avoir ABB'A' dans 4" ;
- le compte-rendu n°5 est possible car :
"AA' > BB', les proportions et les sens sont gardés" ;
- le compte-rendu n° 7 est impossible car :
"AA' et BB' sont en sens contraire alors que, dans le repère R_I , AA' et BB' sont de même sens".

Au total, un étudiant sur deux élimine les compte-rendus n° 3, 6 et 8 parce que AA' et BB' sont de sens contraire. Les positions des mobiles apparaissent comme des grandeurs géométriques.

Les règles générales fournies sont révélatrices : toutes, sauf deux, ne se réfèrent jamais au sens des mouvements des mobiles mais uniquement à l'invariance des distances (parcourues ou instantanées) entre deux points. Les deux règles qui font exception sont exprimées de la façon suivante :

"Dans R_I , a double b ; donc vont dans le même sens".

Il faut remarquer que, lors de la passation, les étudiants de ce test (MA) sont restés perplexes devant l'énoncé. Deux étudiants ont eu une révélation lorsqu'ils ont réalisé que tout se passait comme si les observateurs étaient des conducteurs de voiture. Or, ce sont ces deux étudiants-là qui donnent la règle que l'on vient de citer.

Avec un énoncé abstrait, l'étudiant cherche un critère géométrique qui lui permettra de faire un tri parmi les configurations de points proposés. L'idée que les observateurs et les mobiles sont en mouvement relatif est absente des justifications et des règles fournies : c'est pourquoi nous dirons que l'étudiant, pour ce test abstrait, cherche une caractéristique géométrique du mouvement.

En revanche, avec un énoncé concret, les mouvements des mobiles sont pris en considération, les schémas étant alors une représentation géométrique de ces mouvements. Nous dirons que l'étudiant cherche une caractéristique dynamique du mouvement, nous justifierons ce terme plus tard.

Il nous faut regarder si l'on trouve une trace de ces mêmes caractéristiques dans les tests "position".

2) Comparaison des tests "position-concret" et "position-abstrait"

Pour répondre au test PC, presque tous les étudiants ont utilisé la méthode suivante : à partir des données numériques de l'énoncé, ils construisent deux schémas, l'un à l'instant T, l'autre à l'instant T'. Chacun de ces schémas représente une photographie de la route maritime à l'instant considéré : en d'autres termes, sur un même schéma sont représentées les positions des bateaux "a" et "b", ainsi que celles de tous les bateaux observateurs. La méthode utilisée efface donc le mouvement des bateaux entre les instants T et T' et fait ressortir les contradictions des compte-rendus incompatibles. Avec ces photographies qui "gomment" le mouvement, les étudiants peuvent continuer à penser que les bateaux se déplacent toujours vers le sud. C'est ce que révèle, par exemple, la règle générale suivante :

"Pour tous les observateurs en mouvement relatif les uns par rapport aux autres, les distances et les directions d'un mouvement restent constantes relativement aux référentiels fournis par chaque observateur".

De même, c'est pour ce test qu'un étudiant, n'ayant pas adopté la méthode de ses camarades, élimine tous les compte-rendus pour lesquels "a" et "b" ne se déplacent pas vers le sud. On retrouve, avec ce test, une trace de cet invariant du sens des mouvements.

Le test PA propose aux étudiants deux schémas par compte-rendu qu'il est impossible de relier entre eux.

Parmi les étudiants cohérents, il y en a un sur trois qui considère uniquement le module de la distance qui sépare les deux mobiles à un instant donné et oublie l'ordre de dépassement. Quatre étudiants se réfèrent au sens de AA' par rapport à BB' et non au sens des mouvements. D'ailleurs ce sens, contrairement aux tests concrets, est toujours relatif et jamais intrinsèque car "on peut orienter l'axe dans l'autre sens". De même, avec le critère ordre des mobiles, il ne s'agit plus d'un ordre dû au fait que les mobiles, en mouvement, se sont dépassés, mais tout simplement d'un ordre spatial.

Malgré la présentation adoptée pour ces deux tests, on retrouve des traces de ces caractéristiques géométrique et dynamique du mouvement.

3) Distance à un instant donné

La grande réussite aux tests "position" est, répétons-le, essentiellement due au fait que les étudiants ont pris comme données de départ les positions relatives instantanées des mobiles et leur ont conféré un caractère d'invariant. Il se trouve qu'il s'agit effectivement d'un bon invariant galiléen ; mais il faudrait savoir si ce succès n'est que le résultat d'une coïncidence ou correspond à une compréhension réelle du problème. Les étudiants distinguent-ils une distance parcourue d'une distance instantanée ? Ont-ils compris que le temps joue un rôle important dans cette distinction ? Certainement pas, il suffit de lire les règles fournies. On trouve en effet :

"Les distances doivent être invariantes par changement de repère".

Règles rencontrées pour les tests MA et PC : il ne s'agit pas des mêmes distances à chaque fois et pourtant le "mot" utilisé est le même.

"Il faut que la distance entre A et B et A' et B' entre les instants T et T' soient les mêmes" (un étudiant du test MA).

Pourquoi "entre les instants" et non "aux instants" ?

"Le rapport des distances parcourues doit être le même que dans le cas I".

Règle donnée par un étudiant du test PC ayant utilisé pour répondre l'invariance des distances instantanées. Cet étudiant utilise l'invariance des distances instantanées ; mais appelle celles-ci distances parcourues.

Par ailleurs on trouve, dans les tests MC et PA, des justifications identiques qui conduisent dans un cas à l'invariance des distances parcourues, dans l'autre à celle des distances instantanées. En effet, quatre étudiants du test MC déclarent que :

"Le rapport $\frac{AA'}{BB'}$ (rapport des distances parcourues) doit rester constant car la vitesse est constante et T'-T est constant".

Neuf étudiants du test PA disent :

" $\frac{AB}{A'B'}$ (rapport des distances instantanées) doit rester constant car la vitesse est constante ainsi que T'-T".

Les deux concepts : distance parcourue et distance instantanée entre deux mobiles sont donc loin d'être différenciés.

III. EXPERIENCE "RIVIERE"

A. PRESENTATION DE L'EXPERIENCE

1. Généralités

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier les situations pour lesquelles l'objet est physiquement lié à un mécanisme d'entraînement. En effet c'est pour ce type de situations que les étudiants de l'enquête préliminaire ont fait le moins "d'erreurs" (au sens du physicien) et il s'agit de savoir pourquoi.

Le problème posé est, cette fois, un problème à deux dimensions. En effet, à une dimension, l'analyse bute sur un point important : pour n'importe quel observateur, le mouvement s'effectue suivant une droite - toutes les trajectoires se réduisent à une droite unique et toutes les vitesses ont toujours cette droite comme support -. Il est alors difficile de savoir comment l'étudiant passe d'un référentiel à l'autre. L'étude des mouvements à deux dimensions lève cette ambiguïté : selon le référentiel, la vitesse, le déplacement d'un objet changent de direction, la trajectoire de forme (lorsque le mouvement n'est pas uniforme). Un problème à deux dimensions devrait donc obliger l'étudiant à expliciter ses transformations géométriques et nous permettre en retour de mieux comprendre les raisonnements utilisés.

2. Nature de l'expérience

Nous sommes partis du problème classique de la traversée d'une rivière. Soit une rivière dans laquelle il y a un courant. Deux mobiles identiques, mûs par les mêmes moteurs, partent en même

temps et dans des directions différentes d'un même point d'une berge. Il s'agit de tracer les trajectoires de ces mobiles, de trouver leur orientation et de prévoir, avec justification, l'ordre d'arrivée sur l'autre berge. Ce problème est utilisé, sous des formes diverses, dans la plupart des ouvrages de cinématique. Pour mémoire, nous en donnons deux énoncés en note*.

Nos tests présentent trois différences principales avec les énoncés classiques :

a) Les problèmes sont présentés de façon qualitative, contrairement aux énoncés classiques : pas de chiffres, pas de notations u , v , etc., bref aucun élément qui invite a priori à faire des calculs. Il n'est sans doute pas inutile d'insister sur le fait que ce qui nous intéresse n'est pas de savoir si l'étudiant sait faire un calcul, mais ce qu'il comprend du phénomène en question. Bien souvent, le calcul permet d'escamoter la compréhension : l'énoncé 1, par exemple, est assez explicite pour qu'une application directe de la loi de composition des vitesses conduise au résultat. Mais peut-on dire alors que l'étudiant a compris - en dehors du fait qu'il fallait appliquer cette loi de composition ?

-
- * Enoncé 1 : Un fleuve coule vers le nord à la vitesse de 3 km/h. Un bateau va vers l'est avec une vitesse de 4 km/h par rapport à l'eau.
- Calculer la vitesse du bateau par rapport à la rive.
 - Si le fleuve a 1 km de large, calculer le temps nécessaire pour le traverser.
 - Quelle est la déviation vers le nord subie par le bateau quand il atteint l'autre rive ? (Alonso-Finn. Physique Générale, T.I, p.147)

Enoncé 2 : Un bateau doit traverser une rivière. Sachant que le bateau a une vitesse constante u en module, que la rivière a une largeur d et que le courant de la rivière a une vitesse v , calculer le temps que mettra le bateau pour atteindre l'autre rive :

- 1) par le chemin le plus court en distance
- 2) par le chemin le plus rapide en temps.

Etudier les cas où $u > v$ et $u < v$ (Brelot et al. p.44, T.D. de mécanique).

b) Il s'agit de comparer les mouvements de deux mobiles et non d'un seul. Ceci nous permettra de tester la cohérence des réponses car l'étudiant est obligé de répondre deux fois aux questions de trajectoire et d'orientation. D'autre part, cela permet d'éviter tout calcul : comparer les instants d'arrivée ne nécessite nullement de savoir le temps que met chaque mobile pour traverser.

c) Enfin, les mobiles que nous étudions ne sont pas supposés ponctuels, comme on le fait toujours, sans le dire en général, dans les exercices traditionnels. L'orientation du mobile est, en elle-même, une question délicate ; bien qu'elle sorte du cadre cinématique que nous avons choisi, elle nous a semblé en être un élément important.

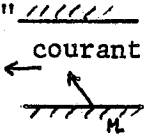
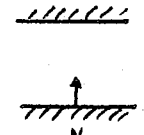
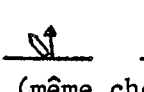
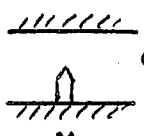
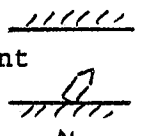
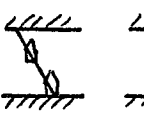
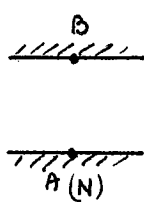
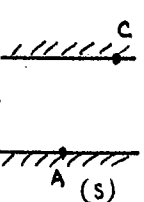
3. Les différents tests proposés

Autour du canevas décrit ci-dessous, ont été bâties quatre sortes de tests, qui diffèrent entre-eux par les éléments contenus dans l'énoncé. Un exemple d'énoncé est donné en annexe. Nous résumons ci-dessous les caractéristiques qui changent d'un test à l'autre. Rappelons que tous se terminent par la même question : ordre d'arrivée et justification.

Chaque test avait deux versions ; pour l'une les mobiles sont des nageurs, pour l'autre des bateaux.

Dans le tableau suivant, apparaissent deux types de tests : Q1 A et Q1 N. Ils ne diffèrent que sur un point : les Q1 A indiquent simplement que dans la rivière "il y a un courant", tandis que les Q1 N précisent qu' "il y a un courant constant, le même partout". Par ailleurs, comme l'indique le tableau, la question de l'orientation des mobiles au milieu de la rivière n'a été posée systématiquement que dans les Q1 N.

Une question ou une donnée portant sur la vitesse est volontairement ambiguë dans les tests Q1 et Q3. Dans ces deux tests, on

	Données	Schémas proposés	Questions posées
Q1 A, N	- "la vitesse au départ"		- tracer la trajectoire
	- diverses orientations du mobile par rapport à cette "vitesse"	  (même chose pour M)	- choisir l'orientation qui paraît correcte - représenter sur la trajectoire les mobiles au milieu de la traversée (Q1N)
Q2 A, N	- orientation au départ		- tracer la trajectoire pour un observateur sur les berges
	- observateur par qui est vue la trajectoire	 idem pour N	- tracer la trajectoire pour un observateur sur un tronc d'arbre flottant dans l'eau - orientation du mobile au milieu (Q2N)
Q3	- 4 trajectoires possibles avec des orientations successives des mobiles (tracées pour un observateur situé sur les berges)	 idem pour N	- choisir la trajectoire qui paraît correcte - représenter la vitesse du mobile sur le schéma choisi
Q4 A, N	- point de départ et d'arrivée sur les berges	 	- tracer la trajectoire et l'orientation du mobile le long de celle-ci (ordre d'arrivée pour Q4N seulement)

Chaque questionnaire avait deux versions, l'une où les mobiles étaient des nageurs, l'autre où il s'agissait de bateaux.

parle de la "vitesse du mobile" sans donner plus de précision. Le problème est de savoir si cette absence de précision est ou non un obstacle pour l'étudiant. Dans ce dernier cas, que signifiera ce terme, que représentera cette vitesse ? Les trajectoires tracées dans Q1 dépendront-elles de cette compréhension ?

Tous les tests (sauf Q4A) se terminent par la même question concernant l'ordre d'arrivée des mobiles. C'est la seule question portant directement sur le temps que nous ayons posée ; sa raison d'être est de voir comment les éléments portant sur les vitesses et les trajectoires sont recombinaés au niveau des durées.

4. Population interrogée

Pour cette étude, nous nous sommes adressés à des étudiants de niveaux universitaires différents. Exceptés les 11 étudiants littéraires avec qui nous avons eu des entretiens individuels, nous avons interrogé 345 étudiants scientifiques qui se répartissent de la façon suivante :

Etudiants en fin de 1ère année*
du D.E.U.G.-S.S.M.

Q1A	Q2A	Q3A	Q4A
50	37	50	25

Etudiants en début de 1ère année
(D.E.U.G.-S.S.M.)

Q1N	Q2N	Q3N
39	80	30

B. RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS

Les résultats obtenus avec cette expérience sont si nombreux qu'il nous a paru souhaitable d'en résumer les aspects principaux,

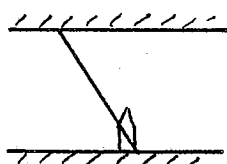
* Les étudiants de fin de 1ère année ont eu un cours de cinématique et de mécanique, contrairement aux autres.

les résultats détaillés se trouvant en annexe (page 81). Le lecteur pourra ainsi, s'il le juge nécessaire, s'y reporter à tout instant.

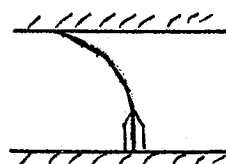
1. D'une manière générale, l'enseignement reçu paraît sans influence sur les réponses : celles-ci sont quasiment les mêmes pour les étudiants entrant ou sortant de la 1ère année d'Université.

Il en va de même de la présentation des questionnaires, hormis le cas de Q3 sur lequel on reviendra : changer la nature des mobiles (nageurs ou bateaux), indiquer ou non que "le courant est constant, le même partout", préciser ou non les repères, faire tracer les trajectoires dans le repère des berges, puis dans celui de l'eau, rien de tout ceci ne modifie les réponses. Enfin on constate qu'il y a deux problèmes assez distincts dans les questionnaires : trajectoires et orientations des mobiles d'un côté, ordre d'arrivée et justification de l'autre. Les réponses au second problème ne paraissent pas influencées par celles données au premier.

2. Les trajectoires et orientations des mobiles au départ, tracées dans le référentiel des berges sont de deux types principaux :



30 %*




27 %*

(seul Q3 ne fait apparaître que des réponses du premier type). Ceci n'exclut cependant pas d'autres possibilités.

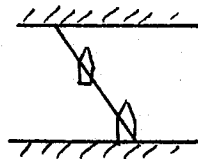


On observe également un certain nombre de réponses qui choisissent des solutions différentes pour les deux mobiles.

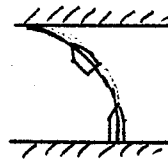
* Il s'agit de pourcentages de réponses cohérentes, c'est-à-dire identiques pour les deux mobiles.

Ces diverses solutions conduisent toutes à la même réponse dans le référentiel de l'eau (), qui ne paraît donc poser aucun problème.

Si l'on tient compte de l'orientation au milieu, on retrouve les deux catégories principales :



16 %



24 %

On constate cependant à ce niveau une dispersion assez grande des résultats.

On notera qu'il n'y a pas de cloisons étanches entre les divers types de solutions proposées par les étudiants. Ils doivent en principe résoudre le même exercice, pour chacun des deux mobiles. Le nombre de réponses "cohérentes", c'est-à-dire identiques pour les deux mobiles, diminue lorsqu'on augmente le nombre de questions : 85 % pour la forme de la trajectoire seule, 73 % pour la forme et l'orientation au départ, 65 % pour la forme et les orientations au départ et au milieu. Encore n'a-t-on pas tenu compte de toutes les incohérences, celles par exemple qui font dire à certains, après avoir tracé des trajectoires droites, que les mobiles pourraient ne pas arriver si le courant est trop fort. Un même étudiant peut donc aisément passer, en cours de route, d'une solution à l'autre. Plutôt que d'opposer ces diverses solutions, il s'agit de comprendre ce qu'elles ont en commun qui facilite ainsi le passage de l'une à l'autre.

3. Difficultés encore, assorties d'incohérences, en ce qui concerne les vitesses des mobiles. Celles-ci peuvent avoir deux significations (vitesse par rapport à l'eau ou aux berges) et l'étudiant peut passer de l'une à l'autre sans s'en apercevoir. La donnée de "la vitesse des mobiles" au départ conduit à deux sortes de départ des trajectoires :



Ces départs correspondent également à des formes différentes, en grande majorité droite pour les premières, inversée pour les secondes. Par contre, les orientations des mobiles par rapport aux vitesses sont beaucoup moins différenciées. Si l'on ajoute à ceci le fait que la question du repère, de "la vitesse par rapport à quoi ?" n'est que rarement formulée, on voit surgir un nouveau problème : que signifie "la vitesse", et quel rôle jouent les référentiels dans les solutions des étudiants ?

4. On a souligné plus haut que les réponses aux questions précédentes n'influent pratiquement pas sur les prévisions des ordres d'arrivées et leurs justifications. Il faut souligner trois aspects de ces justifications :

- le grand nombre (40 %) de celles qui n'utilisent que la distance parcourue, ou la vitesse, en négligeant le troisième terme de la relation $d = vt$.
- l'importance des considérations dynamiques, explicitées dans 30 % des réponses, et qui apparaissent presque aussi souvent à partir de trajectoires rectilignes qu'incurvées
- le faible pourcentage (11 %) de ceux qui parviennent à une justification correcte.

Le cas de Q3 est intéressant. Bien que les trajectoires choisies soient presque toujours de type (A) et qu'aucun étudiant ne choisisse uniquement la solution (B), l'ordre d'arrivée et ses justifications sont identiques à celles des autres questionnaires. Il ne faudrait donc pas déduire trop vite des réponses à la trajectoire une bonne compréhension du problème cinématique. Il est probable que le fait de présenter diverses trajectoires induit la bonne réponse, car on peut alors reconnaître qu'elle est à la fois plausible et la plus simple. Mais si, au lieu de choisir la "bonne trajectoire" parmi plusieurs, il lui fallait la construire, l'étudiant aurait sans doute les mêmes difficultés qu'aux autres

questionnaires, comme en témoignent les problèmes d'ordre d'arrivée.

C. ANALYSE DES RESULTATS : CINEMATIQUE OU DYNAMIQUE

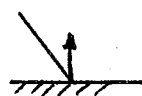
1. Le rôle des référentiels

On a noté l'absence quasi générale du terme de référentiel dans les réponses des étudiants. Lorsqu'ils dessinent une trajectoire ou représentent une vitesse, le problème ne semble pas se poser à eux de savoir par rapport à quoi on définit la vitesse, on trace la trajectoire.

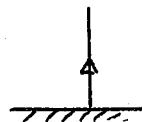
Toute la question est de savoir s'il s'agit d'implicites, sous-jacents aux réponses, non formulés mais compris et utilisés, ou si, au contraire, la notion même de référentiel n'intervient en aucune façon dans la construction des réponses. Question cruciale, car de la présence ou non des référentiels découlent des conceptions radicalement différentes de la cinématique.

Voyons les éléments en faveur de la première thèse. Le schéma sur lequel il faut représenter les trajectoires comprend un dessin des berges, le point de départ des mobiles, le sens du courant (par rapport aux berges) et parfois le point d'arrivée : rien d'étonnant donc à ce que le tracé des trajectoires soit effectué dans ce référentiel, il serait même fort surprenant de voir tracer autre chose et il n'y a guère besoin de préciser par des mots ce que le dessin exprime de lui-même. Par ailleurs, il ne semble pas qu'il y ait des difficultés à tracer une deuxième trajectoire dans le référentiel de l'eau (voir résultats de Q2). Admettons un moment que le tracé des trajectoires soit effectué en tenant compte de façon précise du fait qu'il faut un référentiel pour les tracer. Ceci devrait se refléter de la même façon sur les vitesses.

Le questionnaire Q1 parle des "vitesses des mobiles", sans préciser de quelles vitesses il s'agit, ni par rapport à quoi elles sont définies. Elles sont toutefois représentées par des flèches sur un dessin qui comprend les éléments indiqués ci-dessus (berges, courant, etc.). On doit donc s'attendre à les voir interpréter cette flèche comme la "vitesse par rapport aux berges". Or, on voit dans les réponses deux sortes de départ des trajectoires :



cas (A)



cas (B)

Le cas (A) paraît clair : bien que la trajectoire soit tracée dans le référentiel des berges, la "vitesse" n'est pas celle par rapport aux berges. Pratique courant, dira-t-on, où l'étudiant utilise la vitesse relative, par rapport à l'eau, et la vitesse d'entraînement, le tout sur un même schéma. Il y aurait donc, là encore, utilisation implicite de référentiels, avec combinaison de vitesses pour passer d'un référentiel à l'autre.

Le cas (B) semble rassurant : la trajectoire est dans le référentiel des berges, la vitesse le long de la trajectoire ; il y a donc cohérence parfaite.

On serait tenté d'arrêter là l'analyse, de se satisfaire des explications que l'on vient de donner et d'en conclure qu'il n'y a guère de problème. Une étude plus approfondie montre qu'on aurait tort de croire que les choses sont aussi simples et rassurantes (pour le physicien) que cela.

Le cas (B) peut, en effet, recevoir une autre interprétation. 80 % des trajectoires associées à ce départ sont incurvées, contre 25 % seulement dans le cas (A). D'autre part, si l'on tient compte de l'orientation donnée aux mobiles, on en trouve presque autant orientés suivant la flèche dans le cas (B) que dans le cas (A). Ceci se comprend très bien si l'on admet que les cas (A) et (B)

se distinguent principalement par l'effet du courant, et non par le référentiel dans lequel est interprétée la flèche représentant la vitesse qui, dans les deux cas, correspond à celle dans le référentiel lié à l'eau : premier élément qui fait douter que les réponses soient bâties en utilisant les référentiels.

On retrouve le même problème à Q3. Là, les choses sont bien précisées : les trajectoires, que l'on donne dans l'énoncé, sont tracées dans le référentiel des berges. Pourquoi, alors, lorsqu'on demande de représenter sur le même schéma "la vitesse du mobile", n'y a-t-il que 25 % des réponses qui donnent la vitesse (et 10 % seulement le précisent) par rapport aux berges, c'est-à-dire le long de la trajectoire, contre 50 % qui ne tracent que la vitesse par rapport à l'eau, ou qui font des compositions dans lesquelles n'apparaissent pas les référentiels, mais plutôt les causes : vitesse du mobile (ou vitesse propre), vitesse du courant, vitesse résultante ?

On rencontre le même vocabulaire dans un grand nombre de réponses ; la vitesse du bateau, du nageur, la vitesse du courant, la vitesse résultante ; souvent la vitesse du bateau s'appelle la vitesse propre. Aucun référentiel dans tout ceci, chaque vitesse semble être autonome.

Le même phénomène transparaît à propos des distances : on parle de la distance parcourue par le bateau, le nageur, sans s'occuper de distance par rapport à quoi. Finalement vitesses et distances se combinent éventuellement pour conclure sur les durées de parcours, sans, là encore, qu'il y ait intervention de référentiel. Ceci est particulièrement net lorsqu'un jugement sur le temps résulte d'une combinaison de distance par rapport au sol et de vitesse par rapport à l'eau : on a fréquemment rencontré ce cas, sans bien entendu que les termes "par rapport au sol" ou "par rapport à l'eau" n'interviennent : on combine la vitesse propre et la distance parcourue, sans se poser plus de questions.

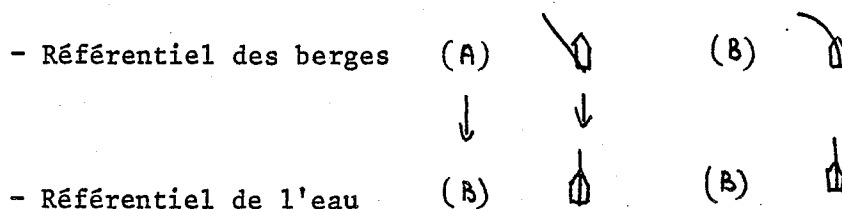
2. Le moteur et ses conséquences

Tout ceci suggère une autre interprétation de la vitesse, à caractère dynamique et causal : la vitesse d'un mobile est celle qui lui est communiquée par son moteur, cause du mouvement. Moteur est employé ici dans son sens le plus général, ce qui fait mouvoir : il s'agit aussi bien des jambes des nageurs que du moteur des bateaux.

Cette interprétation est à la fois banale et bien connue historiquement. Par banale, on veut dire que c'est celle de la vie quotidienne. Qu'elle réapparaisse dans un exercice de cinématique n'est donc guère surprenant : il sera intéressant de voir de façon précise quelles difficultés ou contradictions cela peut introduire dans la compréhension de la physique.

L'introduction de cette notion de moteur éclaire un certain nombre de faits. En particulier, l'intervention permanente de considérations dynamiques dans les réponses.

Nous avons vu que deux départs différents de trajectoires reposaient sur la même interprétation de la "vitesse", comme vitesse propre, vitesse due au moteur propre. Le courant intervient en plus, non pas dans une composition de vitesses, mais comme une cause produisant un effet dynamique. Ceci est très clair à Q2 : des solutions différentes dans le référentiel des berges conduisent à la même solution dans R_e :



Certains commentaires sont particulièrement éclairants ;

"L'observateur se déplaçant avec l'eau, et étant soumis à la force du courant, il ne voit pas l'effet que produit ce dernier sur les bateaux" (B).

"Pour lui (observateur lié au courant), tout se passera comme s'ils ne sont pas soumis à la force du courant" (B).

"Pour lui, les bateaux ne sont pas déviés par le courant" (A).

"Il ne tiendra pas compte de la translation du courant" (A).

"Les trajectoires lui apparaîtront telles qu'elles seraient s'il n'y avait pas de courant" (A).

"Tout se passe comme s'il n'y avait pas de courant" (A).

"Par rapport à un repère mobile dans le même sens avec le courant, et quand la vitesse de déplacement du repère est la même que celle du courant, le vecteur courant est nul. Donc la seule composante du vecteur déplacement est le vecteur force de propulsion, et chaque bateau semble se déplacer en ligne droite" (A).

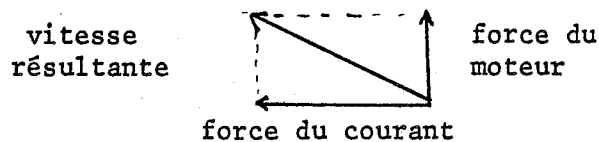
Les arguments avancés pour justifier les trajectoires par rapport à l'eau sont les mêmes, quelle que soit la réponse donnée par rapport aux berges : la trajectoire, dans le repère de l'eau, est une trajectoire apparente qui se déduit de la vraie trajectoire en supprimant l'effet de l'eau. Il est donc normal que tous les étudiants aboutissent au même résultat dans ce référentiel, quelle que soit leur réponse dans celui des berges : seul l'effet supposé du courant varie d'une réponse à l'autre.


On notera au passage que les trajectoires dans le référentiel de l'eau sont toutes rectilignes, ce qui laisse penser que l'énoncé est bien interprété : les mobiles ont une vitesse (par rapport à l'eau ou propre, comme on voudra) constante.

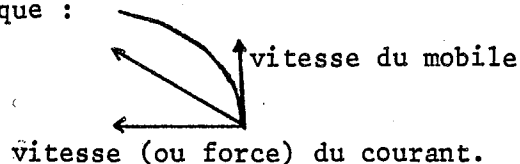
On retrouve ici les notions d' "apparentes" et de "vraies", fort usuelles, même dans le langage du physicien. On comprend mieux pourquoi, à l'ordre d'arrivée, l'étudiant n'utilise presque jamais la trajectoire et la distance parcourue par rapport à l'eau, pas plus à Q2 qu'aux autres questionnaires. La "vraie" trajectoire tout comme la "vraie" distance parcourue est celle qui résulte des effets conjugués du moteur et du courant. La longueur d'un déplacement apparent ne peut être la distance réellement parcourue !

Quant à la combinaison de "vraies" distances et de vitesses "propres", point n'est besoin évidemment de parler de référentiels à leur sujet.

Pour en revenir à l'effet du courant, il peut se manifester de deux façons : il peut incurver peu à peu la trajectoire, qui démarre alors selon la vitesse propre, ou bien la décaler dès le départ par rapport à celle-ci, grâce à une composition des vitesses qui ressemble plus à la détermination d'une résultante de forces qu'à un changement de référentiel cinématique. Certains étudiants, en effet, font les schémas suivants :



Rien d'étonnant alors à ce que les référentiels n'apparaissent jamais : on n'a pas besoin, en général, de faire appel à eux lorsqu'on compose deux forces. On notera que les deux types d'effets peuvent coexister pour un même étudiant, conduisant à des solutions du type , ou encore à des constructions telles que :



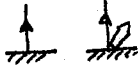
Le problème de l'effet du courant se complique lorsqu'on s'intéresse à l'orientation des mobiles. Des résultats se dégagent principalement deux types de raisonnement : le mobile est orienté selon "sa vitesse" ou bien le mobile est orienté le long de "sa trajectoire". Cette dernière idée est assez naturelle : un mobile (bateau, avion, etc.) a une force, un avant, un arrière, un axe de symétrie longitudinal. Quand on regarde un avion ou un bateau en marche, il est difficile d'imaginer qu'il n'avance pas selon cet axe. On peut cependant y arriver dans le cas où le mobile subit un entraînement (un courant, du vent...) et qu'on le regarde


de l'extérieur : on pourra alors concevoir qu'il avance "en crabe". Mais si l'on se retrouve à l'intérieur du mobile, il devient impossible d'imaginer qu'il avance autrement que selon son axe. D'où l'idée que le mobile est toujours orienté dans la direction de sa trajectoire.

Comment alors accorder ces idées contradictoires : le mobile est orienté dans la direction de sa vitesse, l'effet du courant est de dévier sa trajectoire par rapport à la direction de sa vitesse propre, le mobile est orienté le long de la trajectoire. Une trajectoire incurvée permet de résoudre la difficulté - du moins si on ne l'analyse pas trop à fond - : l'incurvation assure que le mobile ne continue pas dans la direction de sa vitesse propre, mais le mobile reste à chaque instant orienté selon cette vitesse, ce qui lui permet en même temps d'être tangent à la trajectoire.

Cependant cette idée que le mobile doit rester orienté le long de sa trajectoire est tellement puissante que l'on trouve bon nombre d'étudiants qui alignent, au milieu de la rivière, le mobile avec la trajectoire, celle-ci étant une droite.

Pour achever d'illustrer notre analyse, reprenons encore certains faits :

- 6 étudiants, à Q1, ont fourni la réponse , trajectoire droite. Le problème cinématique semble maîtrisé, la vitesse comprise comme celle dans le référentiel où on représente la trajectoire, l'orientation du mobile distinguée de celle-ci, etc. Cependant à l'ordre d'arrivée, 3 justifications sur 6 sont dynamiques (pour l'un, N doit lutter tandis que M se laisse porter, pour deux autres, la résultante des forces est plus grande pour M que pour N) ; un autre part du fait qu'ils ont même vitesse (avec $dM < dN$) ; le suivant se contente de comparer les distances et le dernier ne répond pas. C'est dire que les justifications ne reflètent en rien d'éventuelles différences de compréhension du problème : on retrouve ici le même genre d'arguments que dans les réponses (B).

- L'étudiant, a-t-on dit, peut passer sans s'en rendre compte, d'une signification à l'autre de la vitesse. Ceci est vrai de beaucoup d'étudiants classés incohérents, et sans doute de ceux qui, à Q1, donnent des réponses du type . De même, utiliser le fait que les mobiles ont "même vitesse", en même temps que la distance parcourue par rapport aux berges, pour justifier l'ordre d'arrivée, se rencontre aussi bien dans les réponses (A) que (B).

Ceci est à rapprocher du fait signalé plus haut que si, à Q3, presque tous les étudiants choisissent les trajectoires droites plutôt que les incurvées, ceci ne les empêche pas de revenir à des arguments dynamiques pour justifier l'ordre d'arrivée des mobiles.

- On a relevé le grand nombre d'arguments dynamiques du type "M lutte moins que N" justifiant que M arrive en tête. C'est exactement le raisonnement qu'on ferait pour deux cyclistes roulant à la même vitesse, dans des directions différentes, par un jour de grand vent. Que ces deux problèmes paraissent identiques aux étudiants marque bien la difficulté d'introduire des référentiels : un moteur donne une vitesse, la "cause" suffit à justifier "l'effet".

Il reste à analyser plus en détail la façon dont les étudiants construisent les trajectoires et les transforment d'un référentiel à l'autre. Ceci sera fait plus loin, dans un cadre plus large. L'essentiel est, ici, de se dégager de l'idée que les référentiels jouent un rôle important dans l'élaboration des résultats, et de bien mesurer l'importance des considérations causales et dynamiques.

D. UNE EXPERIENCE COMPLEMENTAIRE : LE TAPIS ROULANT

Si l'interprétation avancée plus haut explique un certain nombre de résultats, on pourrait se demander si les difficultés rencontrées par les étudiants ne sont pas dues uniquement à la nature des exercices proposés, à un certain flou des énoncés, au caractère

fluide du courant, à l'aspect trop concret du problème qui peut faire oublier qu'on a précisé "le courant est constant, le même partout", etc.

Le même problème a donc été repris dans un nouveau contexte : le courant est remplacé par un tapis roulant, les nageurs et bateaux par des voitures à pile. Deux différences essentielles donc avec les tests précédents : il n'y a pas de remous, pas de courant plus fort au milieu qu'au bord ; le repère "mobile" n'est pas fluide et inconsistant, mais parfaitement solide, matérialisé. On a présenté le questionnaire sous les formes Q1 et Q2 (où a été seulement supprimée toute référence à un observateur particulier). 17 étudiants ont subi chacun des tests, tous en fin de 2ème année de 1er cycle.

Le premier résultat est l'apparition, cette fois-ci, des repères : 23/34 étudiants précisent le - ou les - repères dans lequel ils représentent la trajectoire : repère du sol (5), du sol et du tapis (11), du tapis (7). La matérialisation du tapis semble donc avoir beaucoup d'effet. Mais, contrairement à toute attente, la forme des trajectoires ne change pas par rapport au cas de l'eau : sur les 34 étudiants, on trouve 17 D, 14 I, 1 simple flèche et 2 sans réponse. On est bien loin des résultats à Q3.

Les trajectoires incurvées sont parfois des paraboles (6/14) et font, dans 4 autres cas, intervenir des forces de frottement.

A 17 étudiants (Q2), on a demandé l'orientation au milieu : elle sera la même qu'au départ pour les D. (sauf 2 pour qui l'une des 2 voitures revient sur la trajectoire), mais elle aura tourné (comme ci-dessus) pour 5 des 8 I. Les 3 autres sont les seuls à donner à la fois deux trajectoires : I (référentiel du sol), et D (référentiel du tapis). Ils ne répondent pas à l'orientation au milieu : embarras ?

Lorsque l'énoncé parle de "la vitesse des voitures", l'étudiant l'interprète toujours comme la vitesse par rapport au tapis, quel que soit le référentiel dans lequel il trace la trajectoire (Q1). On retrouve la même distinction à Q2 : la vitesse des voitures, la vitesse du tapis. Pas de différence, ici encore, avec le problème de l'eau.

On rencontre aussi quelques difficultés dans les justifications à l'ordre d'arrivée.

- Parmi les 17 D : 11 sont corrects (10 utilisent les distances parcourues sur le tapis, 1 la vitesse perpendiculaire). Mais l'un justifie à la fois les distances par rapport au sol et le fait que les autos ont "même vitesse" ; un autre voudrait connaître le module des vitesses des voitures et du tapis, un troisième pense que le résultat dépend du référentiel, un autre voudrait savoir lequel a la plus grande vitesse dans le référentiel du tapis. Deux enfin ne répondent rien.

- Parmi les 14 I : 3 sont corrects et 4 ne répondent pas. Mais trois se fondent sur la seule distance dans le référentiel du sol ; un pense que cela dépend si on tourne le volant, un autre qu'ils ont "même distance à parcourir, même vitesse relative et même vitesse d'entraînement", donc arriveront ensemble, un troisième "que l'un est favorisé par la direction de sa vitesse" ; enfin, on rencontre une justification dynamique "celui qui va perpendiculairement n'a pas de force à vaincre, tandis que celui qui fait un angle avec le sens de déplacement aura une force supplémentaire à vaincre".

Le passage de la rivière au tapis roulant n'a donc modifié les réponses que sur deux points : l'existence de deux référentiels est ici reconnue dans la grande majorité des réponses, et la distance parcourue peut être évaluée dans l'un ou l'autre de ces référentiels. Ces deux différences nous semblent résulter

essentiellement du caractère "matériel" du tapis : on peut donc y repérer des distances aussi facilement, aussi "réellement" que sur le sol, ce qui n'était pas le cas de l'eau. Mais ceci n'a qu'une influence modérée sur la façon dont les étudiants traitent le problème : "la vitesse" reste la vitesse propre, celle qui est due au moteur ; les trajectoires sont souvent incurvées, toujours dans le sens de déplacement du tapis ; on justifiera éventuellement cette forme par l'existence de forces (ici le frottement), ou encore on affirmera qu'il s'agit de paraboles, autre façon de faire apparaître, sans le dire, de la dynamique ; les mobiles auront tendance à suivre la trajectoire (quand elle est incurvée) ; l'ordre d'arrivée lui-même donnera lieu à des justifications incomplètes ou erronées.

La plupart des éléments utilisés par les étudiants dans le cas de la rivière réapparaissent donc ici. Et si leur influence paraît moins grande dans le cas présent, il ne faut pas oublier que les étudiants interrogés sont en fin de 2ème année de 1er cycle.

ANNEXE A

RESULTATS DE L'ENQUETE "RIVIERE"

A chaque test, les étudiants étaient invités à répondre à un ensemble de plusieurs questions liées entre elles. Pour des raisons de simplification évidentes, on rendra compte globalement des réponses à chaque question particulière, quitte à effacer quelque peu la complexité et la diversité des réponses obtenues. Les résultats n'ont pas fait apparaître de différences significatives entre les tests où les mobiles sont les nageurs et ceux où il s'agit de bateaux. Dans ce qui suit, nous parlerons simplement de mobiles.

Pour simplifier l'exposé, nous utiliseront les notations suivantes :

- Re indique le référentiel de l'eau. V_e la vitesse par rapport à l'eau, T_e la trajectoire tracée dans Re ;
- Rt indique le référentiel des berges, auquel correspondent les vitesses et trajectoires v_t et T_t .

1. Forme des trajectoires

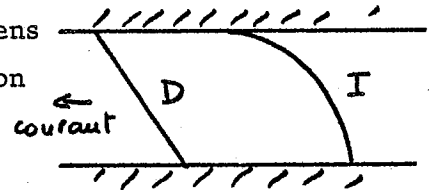
Hormis Q3A, tous les questionnaires demandent de tracer les trajectoires des deux mobiles. Q2 précise la question : tracer d'abord la trajectoire pour un observateur situé sur la berge (Rt), puis pour un observateur placé sur un tronç flottant au fil de l'eau (Re). Q1 et Q4, au contraire, ne précisent rien sur le référentiel dans lequel il s'agit de représenter la trajectoire. Mais dans chaque questionnaire, on présente le dessin des berges, le point de départ des mobiles, le sens de déplacement du courant, ainsi que

- pour Q4 - leur point d'arrivée. Il n'est donc

guère surprenant que la quasi-totalité des trajectoires soient tracées dans le repère Rt. On verra plus loin que quelques cas, cependant, sont un peu ambigus. On notera qu'aucun étudiant n'éprouve le besoin de préciser dans quel référentiel il a tracé sa trajectoire.

Q3 est un questionnaire à part pour les trajectoires : on demande aux étudiants de choisir entre diverses trajectoires possibles, dont on indique qu'elles sont tracées dans Rt. On verra que ce type de question a une forte influence sur la réponse.

Si l'on s'en tient pour l'instant aux formes des trajectoires, elles sont principalement de deux types, regroupant 80 % des réponses : droites (D) ou incurvées, généralement dans le sens du courant, (I). (Quelques rares cas d'incurvation en sens contraire du courant sont observés).



Pour tous ces réponses, les trajectoires des deux mobiles ont la même forme. Parmi les autres réponses, on a distingué divers cas : réponses multiples (en particulier à Q3), réponses d'autres types (une simple flèche indiquant le départ, ou encore une sorte d'escalier), des réponses classées incohérentes (formes différentes pour les deux mobiles) et enfin quelques réponses incomplètes ou sans dessins. L'ensemble des résultats est rassemblé dans le tableau I.

TABLEAU I

	Q _{1,2,4} A	Q _{1,2,4} N	Q ₃ A
Nombre d'étudiants	122	149	50
D	38 % (27 à 46) ⁺	42,5 % (15 à 58) ⁺	72 %
I	45 % (35 à 60) ⁺	42,5 % (25 à 70) ⁺	—
multiples	2,5 %	0,5 %	12 %*
autres	3,5 %	6,5 %	4 %
incohérents	6 %	6 %	6 %
incomplets ou rien	6 %	2 %	6 %

+ Les nombres entre parenthèses indiquent les variations extrêmes d'un test à l'autre, en %.

* Parmi les 6 réponses multiples, 5 donnent D et I "si le courant est variable". On pourrait donc les reclasser avec les D.

On peut faire trois remarques sur le tableau I :

- Il n'y a pas de différences entre étudiants de fin de 1ère année (QA) et de début de 1ère année (QN).

- La précision supplémentaire des énoncés QN (le courant est constant, le même partout) n'a aucune influence sur les résultats.

- Les résultats de Q3N s'écartent nettement de tous les autres : c'est le seul cas où n'apparaissent jamais de trajectoires incurvées seules. On reviendra plus loin sur cette différence entre Q3N et les autres tests.

Passage de Rt à Re

Les questionnaires Q2 A et N demandaient de représenter les trajectoires dans Rt, puis dans Re. Nous donnons dans le tableau II les résultats des seuls étudiants ayant répondu de façon cohérente dans Rt, c'est-à-dire les mêmes réponses (soit D, soit I) pour les deux mobiles.

TABLEAU II

Passage des trajectoires dans Rt à celles dans Re

(Population totale : 117 ét. (Q2 A 37 ; Q2 N 80))

(% réponse) Tt	Te			
	D	I	rien	autres réponses
(49 %) D	91 %	-	9 %	
(33 %) I	59 %	2,5 %	23 %	15,5 %*

* Parmi ces derniers, 10 %, soit 4 étudiants, répondent "la même" sans qu'on sache si c'est "la même" trajectoire dans Re et Rt, ou la même trajectoire dans Re pour les deux mobiles.

On constate que les trajectoires I ont pratiquement disparu de Re, bien que les réponses paraissent un peu plus embarrassées lorsqu'on a d'abord tracé une trajectoire incurvée dans Rt. Au total, 80 étudiants sur 117 ont fourni des réponses D pour les 2 mobiles dans le repère de l'eau, contre 2 I.

2. Position des mobiles par rapport aux trajectoires

Les mobiles dont on vient d'étudier les trajectoires ne sont pas ponctuels ; il s'agit de nageurs ou de bateaux. Rappelons que le problème de leur orientation par rapport à la trajectoire au départ, et l'évolution

de cette orientation le long de la trajectoire ont été posés sous différentes formes :

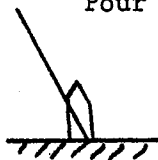
- Q2 : donne l'orientation des mobiles au départ par rapport aux berges. C'est à partir de cette orientation que doit être construite la trajectoire. Q2N demande en plus de représenter la position des mobiles au milieu de l'eau.

- Q3 donne à choisir entre diverses trajectoires sur lesquelles sont représentées les orientations successives des mobiles. Le choix porte donc à la fois sur la forme des trajectoires, et sur les positions des bateaux ou nageurs par rapport à celles-ci.

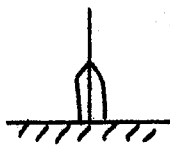
- Q4 fixe les points de départ et d'arrivée. Il faut à la fois représenter le trajet des mobiles et leurs orientations au départ et au cours du trajet.

Ces trois questionnaires donnent donc directement les orientations des mobiles par rapport aux trajectoires. Dans Q1, le problème est décomposé en deux temps : d'abord trouver la trajectoire à partir de "la vitesse", puis choisir entre plusieurs schémas donnant les positions des mobiles par rapport à "la vitesse". Les relations entre orientation des mobiles et direction des trajectoires n'apparaissent donc pas explicitement dans les réponses, mais on peut les reconstituer (cf. § 3 ci-dessous).

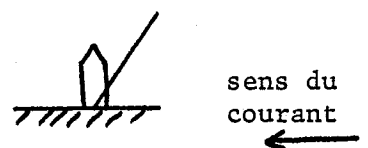
Pour les positions au départ, il y a trois possibilités :



situation a



situation b



situation c

a) Orientation au départ dans Rt

Nous regroupons ici les orientations données explicitement dans Rt (Q2 et Q3) et celles obtenues lorsqu'on ne précise rien sur le référentiel (Q1 et Q4).

Donnons d'abord les réponses pour les trajectoires dans Rt. Le tableau III indique les résultats obtenus, sans tenir compte de la forme des trajectoires. On y a distingué les cas où il n'y a qu'une réponse, la même pour les deux mobiles ; les cas à réponses multiples (obtenus à Q1 et Q3) ; les réponses "incohérentes", c'est-à-dire différentes pour les deux mobiles ; enfin les réponses incomplètes ou l'absence de réponse.

TABLEAU III

	Q _{1,2,4} A	Q _{1,2,4} N	Q ₃ A
a	45 % (28 à 51)*	43 % (20 à 60)*	72 %
b	33,5 % (20 à 60)*	40 % (32 à 53)*	4 %
c	1 %	3 %	-
multiples	2,5 %	2 %	12 %
incohérentes	9 %	6 %	6 %
incomplètes ou rien	9 %	5 %	6 %

* variations extrêmes d'un test à l'autre, en %.

On peut relier la forme des trajectoires à l'orientation des mobiles par rapport à celles-ci. Nous nous limiterons encore aux étudiants ayant donné des formes cohérentes (les mêmes pour les deux mobiles) de type D ou I. Les résultats observés sont rassemblés dans le tableau IV.

TABLEAU IV

Relation entre la forme des trajectoires et l'orientation du
mobile au départ

		$Q_{1,2,4}^A$	$Q_{1,2,4}^N$	Q_3^A
D	a	29	32	72
	b	5,5	7,5	-
	c	-	-	-
	autres	3,5	3	-
	total	38	42,5	72
I	a	11,5	4	-
	b	25,5	29	-
	c	0,5	3,5	-
	autres	7,5	6	-
	total	45	42,5	-

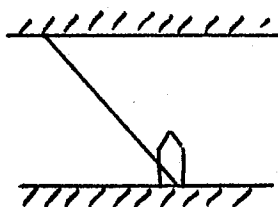
Pourcentage sur l'ensemble
des réponses.

	D	I
a	75	17
b	16,5	63
c	-	5
incohérents*	3,5	7,5
multiples	2	3,5
rien ou incomplets	3	4

* incohérent signifie ici que les trajectoires des deux mobiles ont la même forme, mais que leurs orientations sont différentes.

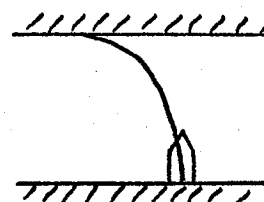
Pourcentage dans chaque
catégorie (ce tableau ne
tient pas compte de Q_3^A).

On retrouve bien entendu la différence entre Q_3^A et les autres tests, ainsi que le parallélisme étroit entre les réponses fournies en début (N) et fin (A) de 1ère année de 1er cycle. Deux catégories principales de réponses cohérentes se dégagent : Da et Ib, c'est-à-dire :



30 % du total

Da



(27% du total)

Ib

Elles sont d'égale importance, et regroupent moins de 60 % du total des réponses. Sur l'ensemble des questionnaires, 74 % des réponses sont

complètes et cohérentes à ce niveau. Le reste des étudiants donnent des réponses multiples, incohérentes ou incomplètes.

On notera au passage que les étudiants ayant répondu à Q₃A choisissent l'option Da, et jamais Db qui leur était présentée. Cependant, les 6 étudiants qui donnent deux réponses choisissent Da et Ib (avec, pour I, un courant variable).

b) Orientation au départ dans Re

Dans Re, les réponses sont aussi unanimes pour l'orientation des mobiles que pour la forme des trajectoires : à une seule exception près, elles sont toujours de type b, quelle que soit la réponse fournie auparavant dans Rt.

c) Orientation au milieu de la traversée dans Rt

Cette question n'était posée, rappelons-le, qu'à Q₄A aux divers QN. Les résultats sont de deux types principaux :

- au milieu, le mobile a la même orientation qu'au départ,
- au milieu, le mobile est tangent à la trajectoire.

Pour simplifier, nous ne donnerons que les résultats des étudiants ayant fourni une réponse cohérente et unique à la fois à la forme des trajectoires et à l'orientation au départ. Sur 118 étudiants, 86 (73 %) sont dans ce cas. L'orientation au milieu donne les résultats suivants :

	Nombre	%
- les mobiles ont la même orientation qu'au départ	34	39,5
- les mobiles tournent pour être tangents à la trajectoire (Tt)	37	43
- les mobiles ont la même orientation et restent alignés avec la trajectoire	5	6
- réponses incohérentes (différentes pour les deux mobiles)	7	8
- pas de réponse	3	3,5

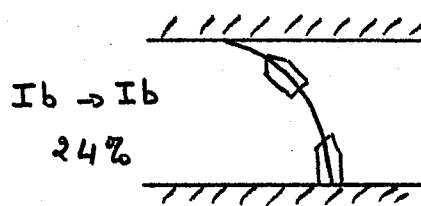
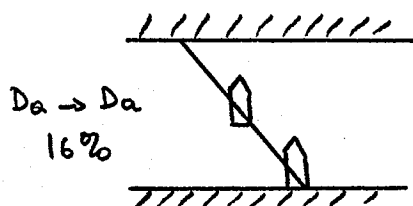
Les relations entre forme des trajectoires, orientation au départ et orientation au milieu sont résumées dans le tableau V (uniquement pour les 76/118 étudiants totalement cohérents).

TABLEAU V

Nombre de réponses

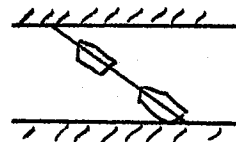
Forme des trajectoires	Orientation au départ	Orientation au milieu		
		a	b	c
D	a	19	5	
	b		5	
I	a	5	3	
	b	6	28	
	c		1	4

On voit se dégager deux catégories principales, rassemblant 40 % du total des réponses :

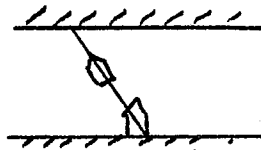


(Ce sont justement ces réponses qui ont été choisies, à Q₃N, par les étudiants donnant 2 réponses).

On constate cependant que les résultats sont assez dispersés, et que la tendance à aligner, au milieu, le mobile avec sa trajectoire est assez grande, même lorsque les trajectoires sont droites. Sur les 35 réponses cohérentes de ce type, on en trouve seulement 18 qui correspondent au schéma Da → Da. Dans 5 cas, le mobile garde la même orientation tout en étant tangent à la trajectoire (schémas Db → Db).



5 réponses font tourner les deux mobiles pour les ramener sur la trajectoire (schémas $Da \rightarrow Db$).

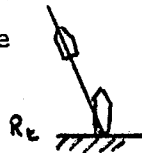


Enfin, 6 réponses choisissent cette solution pour l'un des deux mobiles (soit $Da \rightarrow Db$ pour l'un, $Da \rightarrow Da$ pour l'autre). Ils font partie des 7 réponses incohérentes notées ci-dessus, et n'apparaissent donc pas dans le tableau V.

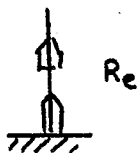
d) Orientation au milieu dans R_t et R_e

L'orientation du mobile en cours de traversée embarrasse donc les étudiants, lorsqu'on la demande par rapport à la trajectoire dans R_t . La difficulté semble encore plus grande si l'on pose la question de l'orientation à la fois dans R_t et dans R_e . Cette question n'a été posée qu'à 8 étudiants dont 7 donnent des trajectoires et orientation au départ Da dans R_t , Db dans R_e , le dernier étant incomplet. Parmi ces 7 étudiants, on obtient les orientations au milieu suivantes :

Exemple
pour M

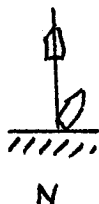


et



- 3 donnent des orientations différentes dans R_t et R_e : dans chaque repère, le mobile est tangent à la trajectoire.

Exemple
dans R_t



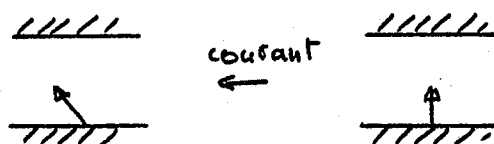
- 2 donnent bien la même orientation dans R_t et R_e mais elles sont différentes pour les deux mobiles : l'un est tangent à la trajectoire dans R_t , l'autre à celle dans R_e

- 2 ne donnent pas de réponse.

Sans vouloir tirer de conclusions trop globales de ces quelques cas, ils montrent bien les deux choix possibles de l'orientation au milieu, et les contradictions qu'ils peuvent entraîner.

3. Vitesses

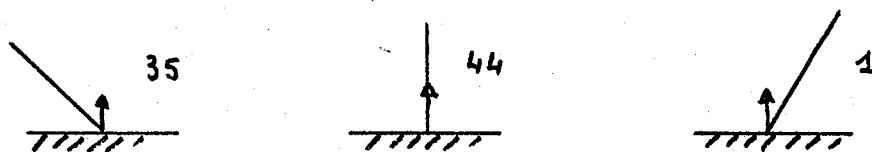
L'énoncé du questionnaire Q1 commence par la phrase : "sur les schémas suivants sont représentés la direction de la vitesse de chacun des mobiles", avec les deux schémas :



Cette phrase est volontairement ambiguë : de quelle vitesse s'agit-il ? celle par rapport à l'eau, ou celle par rapport à la berge ? L'énoncé ne donne aucune précision sur les référentiels. Il s'agit à partir de cette "vitesse" de construire les trajectoires. On a dit plus haut que celles-ci étaient tracées dans le repère des berges, ce qui, au fond n'est guère surprenant compte tenu du type de dessin proposé à l'étudiant. Mais cela ne signifie pas que "la vitesse" soit elle-même comprise comme étant celle dans le repère des berges. Pour le voir, nous allons détailler un peu les réponses à cette question.

Regardons d'abord les départs des trajectoires, sans s'occuper de leur forme. Sur 99 étudiants, on obtient les réponses suivantes :

- 7 : rien ou incomplet
- 12 : réponses différentes, pour les deux mobiles
- 80 : réponses cohérentes, réparties comme suit :



Dès ce niveau, on voit que près de 20 % des étudiants ont des difficultés : 12 étudiants en particulier répondent de façon différente pour les deux mobiles, et donnent donc implicitement des significations différentes aux deux vitesses.

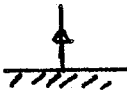
Pour les 80 réponses cohérentes, on voit apparaître deux choix possibles de fréquences comparables, et qu'on pourrait interpréter comme "la vitesse est celle par rapport à l'eau" et "la vitesse est celle par

rapport à la Terre". Mais la forme des trajectoires et l'orientation des mobiles vont venir compliquer l'interprétation. Nous ne les donnons que pour les 80 étudiants cohérents.

- forme des trajectoires en fonction du départ :



23 D - 9 I - 2 flèches - 1 I et D



9 D - 35 I

- orientation des mobiles par rapport à la vitesse : voir tableau VI.

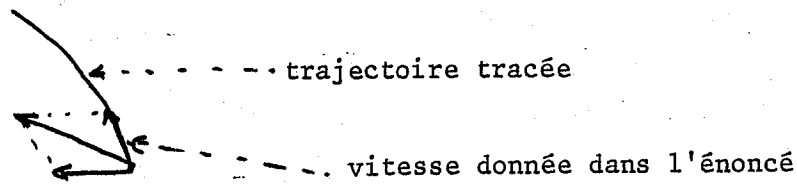
TABLEAU VI

(Nombre d'étudiants : population totale : 99 ét.)

		Position des mobiles par rapport à la vitesse					
					Réponses multiples	Incohérentes (≠ pour les 2)	rien
Départ trajectoire	35 19	{ 16 D 3 I	3 { 3 D -	(2 D 8 { 5 I 1 autre	1	3	1
	44 18	{ 2 D 16 I	15 { 6 D 9 I	8 { 6 I -	4	1	-
	1 -		1	-	-	-	-

La dispersion des résultats est assez grande, et leur interprétation plus complexe. Par exemple, on voit sur le tableau V qu'il y a 18 réponses de type qui choisissent pour les mobiles l'orientation ; 16 correspondent à des trajectoires incurvées. De quelle vitesse s'agit-il donc : V_e ou V_t ?

Il faut encore signaler 8 cas de composition de vitesse qui laissent perplexes : il s'agit de dessins de type suivant



(Parmi ces 8 étudiants, 5 orientent le mobile suivant la résultante).
Nous reviendrons en détail sur ces points dans la discussion.

On notera enfin que le problème du repère a été explicitement formulé par 6 étudiants, qui écrivent :

"La vitesse, dans quel repère ?".

Parmi eux, trois précisent leurs choix : l'un déclare choisir la vitesse par rapport à l'eau et trace la trajectoire dans R_t ; les deux autres disent tracer les trajectoires dans R_t et font tous deux des schémas du type



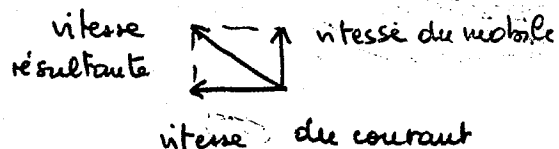
Le problème de la vitesse a également été posé, sous une autre forme, à Q3. Après avoir fait choisir à l'étudiant une trajectoire, on demande de représenter sur le schéma choisi "le sens des vitesses des deux mobiles". Compte tenu qu'on a précisé le référentiel dans lequel est tracée la trajectoire, la solution "logique" serait de représenter la vitesse dans ce même référentiel. Qu'en est-il en fait ? Sur les 50 étudiants interrogés, on obtient les résultats suivants :

- 16 n'indiquent que "la vitesse propre" des mobiles, selon l'expression de certains d'entre eux, et donnent des schémas du type ;
1 ajoute à ce schéma la vitesse du courant

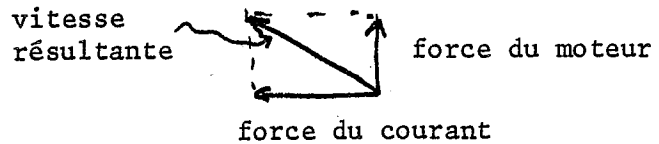


On trouve parfois à côté de ces dessins des commentaires du type "à la vitesse (du mobile) s'ajoute l'action du courant" ; la vitesse finale est la somme de la vitesse du mobile et de celle du courant".

- 8 indiquent ces compositions sur un schéma où apparaît une vitesse résultante à côté de celle du mobile. L'un précise encore : "le mobile a une vitesse propre, à laquelle s'ajoute l'action du courant pour donner une résultante".

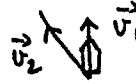



- 4 parlent encore de vitesse résultante, mais cette fois-ci il s'agit de résultante de force. On trouve alors un schéma tel que



Aucune de ces réponses ne parle de référentiels.

- 5 tracent deux vitesses en précisant qu'il s'agit de la vitesse par rapport à l'eau ou aux berges :



- 2 seulement tracent uniquement la vitesse le long de la trajectoire (M) tandis que 5 tracent cette même vitesse, résultant d'une composition. La différence avec les schémas où apparaît une vitesse résultante est qu'ici la vitesse du mobile est celle le long de la trajectoire (du type v_n ) ; 2 autres font la même construction sans rien indiquer, et un dernier fait la construction suivante :



On note encore deux réponses du type rencontré à Q1 :



- Enfin, 5 ne répondent rien.

On voit que la notion de référentiel intervient peu et qu'il y a une grande réticence à appeler "vitesse du mobile" la vitesse le long de la trajectoire : on lui préfère bien souvent "la vitesse propre". Nous retrouverons ce problème dans les justifications des ordres d'arrivée que nous allons aborder maintenant.

4. Ordre d'arrivée

Les réponses sont un peu complexes à analyser, du fait en particulier que l'ordre d'arrivée à Q1 n'est pas forcément le même selon la signification que l'on donne à "la vitesse". Plutôt que de s'attacher aux réponses, nous nous intéresserons à leurs justifications.

Pour justifier un certain ordre d'arrivée, les étudiants doivent en principe tenir compte de deux éléments pour chaque mobile : sa vitesse et la distance qu'il parcourt. On peut donc d'abord caractériser les réponses par le nombre d'éléments qui y interviennent. Des réponses à un élément seront du type "le premier est celui qui parcourt la plus courte distance ; celui qui a la plus grande vitesse ; celui qui fait le moins d'effort". On a classé comme réponses à 2 éléments celles où distance et vitesse interviennent implicitement ou explicitement, quelle que soit par ailleurs l'exactitude de la justification. (Par exemple, les deux mobiles ont la même vitesse et parcourent des distances différentes ; ou encore le premier est celui qui parcourt la plus courte distance dans le repère de l'eau, etc...). On voit ainsi que les réponses à deux éléments tiennent compte de l'ensemble des données cinématiques, tandis que celles à un élément se satisfont d'un raisonnement cinématique incomplet.

Le tableau VII donne l'analyse des justifications selon ce critère.

TABLEAU VII

	Population	1 élément	2 éléments	pas de justification
$Q_{1,2}^A$	97	37 %	40 %	23 %
$Q_{1,2,4}^N$	149	44 %	37 %	19 %
Q_3^A	50	34 %	46 %	20 %

Globalement, il n'y a guère de différence d'un questionnaire à l'autre. La différence entre Q_3^A et les autres tests a pratiquement disparu, et les étudiants de début et de fin de 1ère année se comportent sensiblement de la même façon.

On peut être surpris du nombre élevé de justifications à un seul élément. Ce nombre diminue légèrement lorsqu'on ne considère que les étudiants ayant répondu de façon cohérente aux questions de trajectoire de type Da et Ib étudiées plus haut (cf. p. 87).

TABLEAU VIII

Réponse	Da			Ib		
Nombre d'éléments de la justification	1	2	-	1	2	-
$Q_{1,2}^A$	16%	61%	23%	32%	42%	26%
$Q_{1,2,4}^N$	38%	45%	7%	39%	44%	17%
Q_3^A	30%	54%	16%	-	-	-

Au total, mis à part les étudiants qui font des trajectoires cohérentes de type Da à $Q_{1,2}^A$, la proportion des réponses à un seul élément reste assez importante.

Ces réponses peuvent se ventiler en trois catégories :

- X arrive le premier parce qu'il parcourt une distance plus faible (il s'agit ici de la distance dans Rt. On a dit que la même phrase où la distance est celle parcourue dans Re, a été comptée comme une réponse à deux éléments).

- X arrive le premier parce qu'il a une plus grande vitesse.

- X arrive le premier parce qu'il fait moins d'effort.

Leurs proportions respectives sont de 44, 31 et 25 %. On aura noté au passage l'intervention de la notion d'effort, sur laquelle nous reviendrons bientôt.

Donner une justification à deux éléments ne signifie pas du tout qu'elle soit convaincante. Par exemple, un certain nombre d'étudiants pensent que les deux mobiles arriveront en même temps, parce que la vitesse plus faible de l'un sera compensée par le fait qu'il a moins de chemin à parcourir. Ou encore, on affirme que l'un a plus de distance à parcourir,

mais il est plus poussé par le courant et arrivera donc le premier. Citons aussi ceux qui disent : "les deux mobiles ont la même vitesse ; le premier sera donc celui qui a la plus courte distance à parcourir" et qui utilisent la longueur de la trajectoire dans le repère des berges pour établir leur résultat (21 réponses de ce type). Finalement sur 296 étudiants, 33 donnent une justification convaincante :

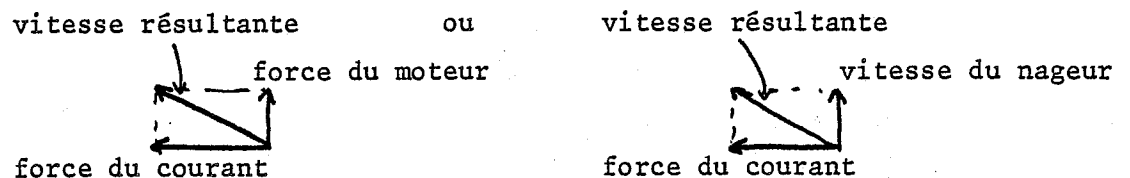
- 2 font un calcul complet et correct dans Rt (1A, 1N)
- 16 raisonnent sur les composantes des vitesses perpendiculaires au courant et aux berges (8A/147, 8N/149)
- 15 raisonnent dans le repère de l'eau, où les mobiles ont la même vitesse (8A, 7N).

Il n'y a pas de différence ici encore entre étudiants en début et fin de 1ère année. On remarque la très faible proportion de ceux qui utilisent, pour l'ordre d'arrivée, la trajectoire dans le référentiel de l'eau (ou toute procédure équivalente, quoique ne faisant pas intervenir explicitement de repère ; certains parmi les 15 cités disent simplement : l'ordre est le même qu'en l'absence de courant). Ceci peut paraître normal, sauf sans doute au questionnaire Q2, où l'on a vu que les étudiants devaient représenter les trajectoires à la fois dans Rt et dans Re. Bien qu'ils réussissent assez bien cette dernière question, cela n'a pas d'influence sur l'ordre d'arrivée : 6/80 utilisent la trajectoire dans Re à Q2A et 2/37 à Q2N. Ces résultats ne diffèrent pas de ceux des autres questionnaires.

En plus ou à la place des éléments cinématiques, les justifications contiennent souvent des éléments dynamiques ; on en distinguera deux types, qui peuvent du reste apparaître dans la même réponse. Tout d'abord, l'effet du courant n'est pas le même selon que le mobile a une orientation ou une "vitesse propre" qui "s'oppose" ou "est en accord" avec le courant, pour reprendre les termes mêmes des étudiants. Dans le premier cas, il va "lutter", "rencontrer de la résistance", il doit "vaincre le courant", il "fera des efforts pour combattre la vitesse du courant" ; dans le second cas, il va "être emporté", il "se fatigue moins", il "fait moins d'efforts", etc... Il est clair que celui qui lutte va arriver le dernier. Ceci peut encore se traduire en termes plus "physiques" : "l'un a plus

de courant à vaincre. L'autre a donc plus de puissance à employer pour avancer que le premier qui emploie cette puissance à vaincre le courant". Ou encore : "ils produisent la même force. L'un, sur une distance plus courte, produit un travail plus grand que l'autre sur une distance égale".

Ceci nous amène à l'autre type d'explication, qui fait intervenir explicitement la notion de force : force du moteur ou des jambes du nageur, force du courant (grâce souvent à un mélange d'expressions telles que "le courant est fort" d'où "le courant a de la force" et enfin "la force du courant"). Arrivé à ce point, l'étudiant va raisonner en termes de forces. Celles-ci peuvent servir à trouver les vitesses, par des constructions du type



ou encore à justifier que ces vitesses sont différentes, ou mêmes égales : "même force du moteur et même force du courant, donc même vitesse". Ces forces peuvent aussi agir de façon différente sur les deux mobiles "l'un subit une force moins grande de la part du courant que l'autre". Elles conduisent également à des raisonnements purement dynamiques : "le mobile suit la direction de la vitesse et il y a une force qui l'attire, c'est la force du courant". "Les deux mobiles ont la même vitesse initiale, ils sont soumis à la même force, ils ont donc un mouvement uniformément accéléré" ; on verra alors apparaître quelques calculs avec $\vec{F} = m\vec{\gamma}$, des mouvements circulaires ("car les modules des vitesses sont constants, mais pas leur direction à cause de la force du courant"), des trajectoires paraboliques, etc...

L'importance des considérations dynamiques dans les justifications est résumé dans le tableau IX. On y donne à la fois leur fréquence sur l'ensemble des réponses, et leurs fréquences pour les étudiants qui ont répondu de façon cohérente aux trajets et orientation, pour les réponses Da et Ib.

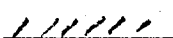
TABLEAU IX

Pourcentage des justifications contenant des éléments dynamiques

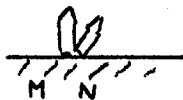
	% du total des réponses	% dans les réponses Da	% dans les réponses Ib
Q _{1,2} A	28	23	13
Q _{1,2,4} N	33	32	39
Q ₃ A	28	32	-

On constate qu'il n'y a guère de différences entre étudiants anciens et nouveaux, et que les réponses aux trajectoires n'influent pratiquement pas sur l'apparition des explications dynamiques.

Cette indépendance entre forme des trajectoires et orientation d'une part, ordre d'arrivée d'autre part peut également se voir si l'on regarde quel mobile est déclaré arriver le premier. Nous ne donnerons que les résultats des questionnaires où l'ordre d'arrivée ne présente aucune ambiguïté (pour Q1, cet ordre dépend du sens que l'on a donné au mot "vitesse"). Rappelons les énoncés :

Q_{2,3} 

← courant



Q₄



← courant



partis tous deux de A, M arrive en B et N en C.

Les réponses se répartissent principalement en trois catégories : le premier est M, ou N, ils arrivent en même temps. Le tableau X donne le pourcentage de ces réponses, sur l'ensemble des étudiants et pour ceux qui ont répondu de façon cohérente Da ou Ib aux trajectoires-orientations.

TABLEAU X

Ordre d'arrivée (en %)

	Q ₄ N			Q _{2,3} A et N		
Premier arrivé	M	N	≡	M	N	≡
% du total	63	-	7	40	22	16
% parmi les "Da"	60	-	-	44	23	17
% parmi les "Ib"	70	-	10	48	12	28

Le reste des réponses se ventile en "cela dépend", "je ne sais pas" ou aucune réponse.

Au total l'ordre d'arrivée paraît assez déconnecté des réponses précédentes.

IV. EXPERIENCE CAILLOU

A. PRESENTATION DE L'EXPERIENCE

Cette expérience limitée a pour but de compléter les recherches précédentes sur deux points précis :

- étudier une situation équivalente cinématiquement à celle de la rivière, mais pour laquelle l'objet n'est plus entraîné physiquement. Si nos hypothèses précédentes sont correctes, les réponses fournies devraient être assez différentes de celles du cas avec entraînement ;

- savoir comment un étudiant évalue la distance parcourue par un mobile lorsque les points de départ et d'arrivée sont matérialisés. On a déjà vu le problème lors de l'enquête préliminaire. La difficulté ici est double. Il peut y avoir confusion entre distance parcourue évaluée le long de la trajectoire et distance séparant les points de départ et d'arrivée. Le choix étant fait pour l'une ou pour l'autre distance, il faut encore voir comment elle se transforme ou non d'un référentiel à l'autre.

1. Nature de l'enquête

Le problème posé est encore un problème à deux dimensions : nous avons vu, dans l'expérience précédente, tout l'intérêt que présente un tel choix.

La situation proposée est la suivante : un observateur A est immobile sur une rive, supposée rectiligne, d'un lac ; un autre, B, se trouve sur un bateau qui se déplace à vitesse constante,

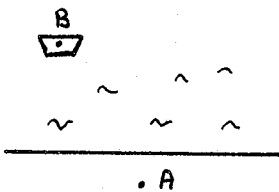
parallèlement à la rive et à une courte distance du bord. L'un des observateurs lance des cailloux droit devant lui et horizontalement. Un de ces cailloux est reçu par le deuxième observateur, qui le renvoie à son tour au premier.

Le problème consiste à tracer la trajectoire de ce caillou dans le référentiel de A puis dans celui de B. Ensuite, on demande si la distance parcourue par ce caillou, lorsqu'il va d'un observateur à l'autre, est la même ou différente pour les deux observateurs A et B.

2. Nature des tests

A partir du schéma précédent, nous avons construit trois tests dont les différences sont explicitées dans le tableau I.

Tableau I

<u>Situation</u>	<u>Questions</u>	
 <p>Q1 - A lance à B</p> <p>Q1bis - A lance à B B relance à A</p> <p>Q2 - B lance à A A relance à B</p>	<p>Trajectoires demandées (dans référentiels de A et B)</p> <p>aller (A→B)</p> <p>aller (A→B)</p> <p>aller (B→A)</p>	<p>Comparaison des distances parcourues pour A et B</p> <p>aller</p> <p>retour</p> <p>retour</p> <p>Comparaison temps mis par le caillou pour effectuer les voyages aller et retour</p>

Ce tableau appelle certaines remarques :

a) Nous avons élargi l'éventail des situations physiques. Dans l'expérience "rivière", il y avait à composer la vitesse "propre" du mobile à celle du courant, avec l'intermédiaire physique de l'entraînement s'exerçant en permanence. Ici on étudie deux situations nouvelles. Dans l'une (Q2), l'entraînement existe, mais est momentané : avant le lancement, le caillou est entraîné, comme B, par le bateau ; mais les liens physiques cessent tout de suite après le lancement. Dans l'autre (Q1, 1bis), il n'y a aucun entraînement, et donc s'il y a composition des vitesses du caillou et de B, elle ne peut qu'être cinématique. D'où la nécessité de comparer toutes ces situations en demandant à chaque fois de tracer les trajectoires du caillou dans les deux référentiels.

b) Pour comparer les distances parcourues, deux possibilités ont été exploitées. La question porte sur le trajet aller (Q1) - celui pour lequel on vient de tracer les trajectoires -, ou sur le trajet retour (Q2 et Q1bis) pour lequel aucune trajectoire concernant ce trajet n'est demandé. Les étudiants de Q1 ont, en principe, tous les éléments pour répondre à cette question : le problème est de savoir s'ils vont en tenir compte. Cette variation autour d'une même situation doit permettre de recueillir quelques informations sur l'influence respective des points de départ et d'arrivée et des trajectoires dans l'évaluation des distances parcourues.

c) Le test Q2 comporte une question complémentaire sur les durées de parcours du caillou à l'aller et au retour. Il faut remarquer qu'il manque des données pour répondre à cette question : en effet, rien n'est dit sur les modules respectifs des vitesses des cailloux par rapport à chaque lanceur. Cette question "piège" a été posée afin de savoir si l'étudiant s'apercevra de cette absence de précision et s'il fera des hypothèses : si oui, lesquelles, si non, comment répondra-t-il à la question ?

Enfin, il sera intéressant de voir ici, comme à l'expérience

"rivière", si les distances utilisées pour évaluer les durées sont définies dans le même référentiel, celui de A ou de B, ou s'il y a mélange d'éléments qui en sont en théorie rattachés à des référentiels différents.

3. Population interrogée

Ces tests ont été posés sous forme de tests papier-crayon anonymes à des étudiants de première année d'université (Paris VII) au cours du second semestre ; ce qui signifie qu'ils ont tous reçu un enseignement sur la cinématique au premier semestre.

La répartition est la suivante :

Q1 et Q1bis	N = 52
Q2	N = 35

On a vu dans l'expérience précédente que le niveau d'étude jouait assez peu (au moins si l'on s'en tient à une population limitée aux premières années universitaires). On s'est donc contenté ici d'étudiants de la même année. Ceci n'exclut évidemment pas la possibilité d'études ultérieures plus différenciées. Les résultats seront donc utilisés comme révélateurs plus que pour leur valeur statistique.

B. RESUME ET ANALYSE DES RESULTATS

Ici encore, nous ne donnerons qu'un résumé des résultats, le détail de ceux-ci se trouvant en annexe (p.112).

Les étudiants de ces tests devaient tous construire des trajectoires et répondre à une question portant sur les distances parcourues. Seuls les étudiants de Q2 devaient, en plus, comparer les durées de parcours du caillou.

1. Les trajectoires

a) 17 % (à Q1 et 1bis) et 14 % (à Q2) des étudiants déclarent que le caillou n'a qu'une seule trajectoire, donc la même pour A et B.

De plus, 19 % des réponses à Q1 et 1bis peuvent également être rattachées à la même catégorie. Il y a bien différence optique de point de vue entre A et B, "puisque'ils ne sont pas placés au même endroit", mais, de ce fait, ils ne voient pas de la même façon la trajectoire qui est une parabole.

On rencontre ici une différence importante avec l'expérience "rivière", dans laquelle l'existence de deux trajectoires différentes était bien reconnue. Moins il y a d'entraînement (rivière, Q2, Q1 et 1bis), et plus on rencontre des trajectoires uniques, les mêmes pour tous les observateurs - aux problèmes de vision près.

b) Chez les étudiants ayant répondu que les trajectoires sont différentes pour A et B, on observe deux types de trajectoires : l'une est droite (D), l'autre est incurvée (I). Rappelons que les situations des tests Q1, Q1bis et Q2 sont formellement identiques : on doit donc, en principe, tracer dans le référentiel de celui qui lance le caillou, une trajectoire droite du type (\uparrow), et dans le référentiel de celui qui reçoit le caillou, une trajectoire encore droite mais du type (\searrow). Les résultats obtenus sont les suivants :

(% des réponses à Q1 et 1bis)	Trajectoires dans le référentiel de celui qui reçoit le caillou (R _B)	
	D (\searrow)	I (\curvearrowright)
Trajectoire dans le référentiel de celui qui lance le caillou (R _A)		
(64 %) D (\uparrow) (-) I	11,5 -	52,5 -

(% des réponses à Q2)	Trajectoire dans le référentiel de celui qui reçoit le caillou (R _A)		
Trajectoire dans le référentiel de celui qui lance le caillou (R _B)	D (↖) (↑)	I (↗)	Pas de traj.
(58 %) D (↑)	29 -	23	6
(28 %) I	14 14	-	-

Ces tableaux appellent un certain nombre de remarques :

i - Si nous nous intéressons aux trajectoires tracées dans le référentiel de celui qui reçoit le caillou (R_B pour Q1 et Ibis et R_A pour Q2), on s'aperçoit que le comportement des étudiants diffère beaucoup d'un test à l'autre et même à l'intérieur d'un même test.

Tout d'abord, on constate que 14 % des étudiants de Q2 tracent une trajectoire du type (↑) dans le référentiel de celui qui reçoit le caillou, ici R_A, car, nous dit-on, "pour que le caillou touche A, il faut que B lance le caillou lorsqu'il est juste en face de A". C'est sans aucun doute l'absence de lien physique permanent entre le caillou et le bateau qui est à l'origine d'une telle réponse.

Par ailleurs, le nombre des trajectoires (↖) et leurs justifications varient d'un test à l'autre. Tous les étudiants, à Q2, les justifient par une composition des vitesses, tandis qu'à Q1 et Ibis, un seul opère ainsi, les autres ne donnant aucune justification. Une explication de ces différences peut être la suivante : à Q2, il faut composer deux vitesses associées directement à un moteur, tandis qu'à Q1 et Ibis l'une des deux vitesses (celle de A par rapport à B) ne présente pas de lien direct avec un moteur. La composition causale est possible à Q2, pas à Q1 et Ibis.

ii - Ces tableaux indiquent aussi que le nombre d'étudiants qui tracent une trajectoire droite (\searrow ou \uparrow) dans un référentiel et incurvée dans l'autre est élevé (52,5 % pour Q1 et Ibis et 51 % pour Q2). Les étudiants se répartissent alors en deux groupes :

. l'un concerne tous ceux qui ont tracé une trajectoire D dans R_A et I dans R_B (et ceci quel que soit le test). La seule vitesse qu'on observe éventuellement sur les schémas est la vitesse de lancement du caillou ; la courbure de la trajectoire est liée au mouvement de l'observateur (mouvement de B pour Q2 et mouvement de A par rapport à B pour Q1 et Ibis) : "B avance sur son bateau", "B bouge", "B se déplace par rapport au caillou et à lui-même", "pour B, A se déplace à vitesse constante dans l'autre sens", ...

. l'autre concerne tous ceux qui tracent une trajectoire D dans R_B et I dans R_A (se rencontrent uniquement dans Q2). Ce groupe se subdivise en deux sous-groupes égaux : l'un trace dans R_A une droite du type (\uparrow) car "pour que le caillou touche A, il faut que B le lance lorsqu'il est juste en face de A" (l'entraînement n'est alors pas pris en compte) et si la trajectoire est incurvée dans R_B , c'est tout simplement parce que "B bouge" ; l'autre trace dans R_A une trajectoire (\searrow) obtenue à partir de la prise en considération de deux vitesses, celle de lancement du caillou et celle du bateau, les justifications accompagnant la trajectoire I dans R_B sont peu nombreuses : l'une fait intervenir la résistance de l'air et deux autres le vent.

c) Remarquons enfin que les vitesses ne sont jamais définies dans un référentiel : les étudiants parlent de la vitesse du caillou, la vitesse du bateau (y compris celui qui, dans Q1, est le seul à introduire la vitesse de A par rapport à B). Ces vitesses sont parfois assimilées à des forces : on lit, par exemple à Q2 : "Pour B, la vitesse du caillou est la force réelle à savoir la force musculaire de B". C'est bien le moteur qui est à l'origine de la vitesse.

Cette indifférenciation partielle entre vitesse propre et

force se retrouve dans Q2 lorsque les étudiants doivent comparer les durées de parcours du caillou. Presque tous ceux qui répondent utilisent explicitement le terme de force : "forces de lancement", "force avec laquelle X relance le caillou".

2. Les distances parcourues

Une différence assez importante existe entre les tests Q1 d'une part et Q1bis d'autre part. Avec le premier, la question posée est directe en ce sens qu'elle concerne le trajet pour lequel on vient de tracer les trajectoires alors que ce n'est pas le cas pour les seconds.

Un nombre élevé d'étudiants répondent que "la distance parcourue est la même pour les observateurs" (50 % pour Q1 et 65,5 % pour Q1bis et Q2). Cependant, en regardant les réponses fournies aux distances parcourues, aux trajectoires et les justifications, on constate une légère différence entre les tests.

a) Réponses aux distances et aux trajectoires :

	% de réponses identiques aux distances et aux tra- jectoires		% de réponses différentes aux dsitances et aux tra- jectoires	
	D et T \equiv	D et T \neq	D \equiv , T \neq	D \neq , T \equiv
Q1 (q. directe)	25	40	27,5	7,5
Q1bis et Q2	20	17,5	50	12,5

Les pourcentages de réponses "D et T \neq " et "D \equiv et T \neq " varient en sens inverse d'un test à l'autre : cependant, les populations concernées étant très faibles, il est difficile d'en tirer des conclusions statistiques significatives.

b) Si on s'intéresse aux justifications, on s'aperçoit que 95 %

des étudiants de Q1bis et Q2 justifient leurs réponses contre seulement 33 % à Q1. De même, le nombre d'étudiants justifiant la réponse "distances différentes" est deux fois moins élevé à Q1 qu'aux autres tests. Les justifications fournies sont de deux types :

- deux étudiants se réfèrent aux trajectoires tracées
- deux autres composent des distances et font une distinction entre distances réelle et apparente, distinction qui n'apparaît jamais dans les tests Q1bis et Q2, même lorsque les étudiants de ces tests ont également composé des distances.

Remarquons enfin que, si les distances parcourues sont déclarées différentes,

- ce n'est pas parce qu'elles sont mesurées dans des référentiels différents, mais tout simplement parce que l'une est réelle et l'autre apparente,
- elles ne peuvent être déduites des trajectoires tracées car toutes les distances apparaissant sur les schémas sont des segments de droite alors qu'une des deux trajectoires tracées est incurvée.

Cet ensemble de résultats indique qu'un certain nombre d'étudiants de Q1 s'est trouvé confronté à des difficultés qu'ils n'ont pas tous réussi à surmonter. Quant aux autres, ils ne sont guère embarrassés, leurs justifications ressemblant étrangement à celles de leurs camarades des autres tests. En effet, la distance parcourue est la même car :

- "c'est indépendant des repères" (Q1, Q2, Q1bis)
- "parce que, dans un cas A est fixe et B bouge, dans l'autre c'est le contraire" (Q2)
- "pour n'importe qui la distance entre deux points ne bouge pas" (Q1)
- "c'est la même, éventuellement des effets de perspective peuvent jouer" (Q2)
- "c'est la même, ce sont les référentiels choisis qui font apparaître les trajectoires différentes" (Q1)
- "la distance ne varie pas, quelle que soit la position de l'observateur (Q1bis), etc.

En résumé, une distance parcourue n'est pas plus que la vitesse définie dans un référentiel. Pour la majorité des étudiants, cette distance n'est pas déduite de la trajectoire tracée : en effet, quelle que soit la forme de la trajectoire, elle est toujours représentée par la longueur d'un segment de droite qui relie le point de départ au point d'arrivée. Ces derniers étant, dans la plupart des cas, considérés comme des points fixes, la distance parcourue devient alors une "donnée" indépendante des observateurs.

3. Les réponses aux durées de parcours

Cette question a été posée, rappelons-le, afin de voir si, d'une part les étudiants s'apercevraient qu'il manque des données et si, d'autre part, ils combineraient, dans leur réponse, distances et vitesses définies dans des référentiels différents.

Sur le premier point, 40 % des étudiants mentionnent qu'il manque des données : 17 % ne peuvent répondre car ils ne connaissent pas "la vitesse à laquelle A relance le caillou" (10 %) ou encore "les positions de A et de B" (7 %) ; 23 % supposent que "les forces de lancement sont les mêmes", "celui qui relance le caillou le relance avec la même force". C'est d'ailleurs l'hypothèse implicite que font la plupart des étudiants qui donnent une réponse, sans s'être le moins du monde aperçus qu'il manquait une donnée.

Sur le deuxième point, on retrouve le même type de comportement que dans l'expérience "rivière" :

- 64 % des réponses sont à un seul élément à savoir "la vitesse de lancement" (ils utilisent donc des vitesses définies dans des référentiels différents) ou encore, pour la majorité d'entre elles, "les distances parcourues" (là encore, on trouve des distances tracées dans le référentiel de B pour l'aller et dans le référentiel de A pour le retour)

- quant aux réponses à deux éléments, elles font toutes apparaître "les vitesses de lancement" : là encore, les étudiants combinent avec aisance des grandeurs définies dans des référentiels différents.

ANNEXE BRESULTATS DETAILLES DE L'EXPERIENCE "CAILLOU"

Nous donnerons tout d'abord les résultats sur les trajectoires puis sur les distances parcourues pour terminer sur les temps de parcours qui, rappelons-le, ne concernent que les étudiants de Q2.

I. LES TRAJECTOIRES

Pour tous les tests, l'ordre des questions est le même : tracer la trajectoire du caillou dans le référentiel de A puis savoir si la trajectoire de ce caillou est la même ou différente dans le référentiel de B. Si la réponse donnée est "trajectoires différentes", l'étudiant doit alors tracer celle qu'il a dans le référentiel de B.

- Différenciation des trajectoires selon l'observateur

Le tableau II donne les résultats globaux selon que les trajectoires sont considérées comme identiques ou différentes pour les deux observateurs.

Tableau II

	Q1 et Ibis	Q2
Trajectoires identiques	36 % (dont 19 %)	14 %
Trajectoires différentes	64 %	86 %

Pour tous ces tests, l'énoncé insistait sur le fait que le lanceur de cailloux les lançait droit devant lui et horizontalement et que le bateau se trouvait à une courte distance du bord : ceci afin de négliger les effets de la pesanteur. Une figure était donnée dans l'énoncé afin de rendre celui-ci plus clair, mais aussi pour inciter les étudiants à considérer le mouvement de l'objet dans un plan horizontal. Malgré ces précautions, certains étudiants (19 %) de Q1 et 1bis ont explicitement tenu compte de la pesanteur et ont tracé une parabole qui relie A à B. Aucun étudiant de Q2 ne tient compte de la pesanteur, certains précisant même que l'on a négligé celle-ci.

Bien que ces étudiants déclarent que A et B ne voient pas la même chose, nous avons classé leur réponse dans "trajectoires identiques", pour les raisons suivantes :

- tous tracent une seule trajectoire et non deux
- si A et B ne voient pas la même chose, c'est parce que les observateurs ne regardent pas "la trajectoire du caillou" de la même façon : "A regarde droit devant lui et voit donc cette parabole comme une droite ; B, situé différemment, voit le plan perpendiculaire à A et voit la parabole". On verra que les justifications fournies par les autres étudiants ne se réfèrent pas aux positions de A et B mais à leur mouvement.

- Passage d'un référentiel à l'autre. Forme des trajectoires

Les trajectoires tracées sont de deux types : droites (D) ou incurvées (I).

- 36 % des étudiants de Q1 et Q1bis et 14 % des étudiants de Q2 déclarent les trajectoires identiques. A part les 19 % de Q1 et Q1bis déjà cités, tous les autres tracent une trajectoire de type D.

- Les étudiants qui répondent trajectoires différentes ont des comportements différents d'un test à l'autre. Nous étudierons donc les résultats de ces tests séparément, quitte à les regrouper ensuite.

a) Tests Q1 et Q1bis

Le tableau III résume les résultats.

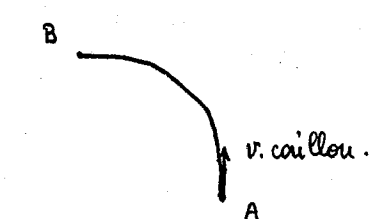
Tableau III

			Référentiel de B (R_B)	
% des réponses			D	I
Référentiel de	(64 %)	D	11,5	52,5
A (R_A)	(-)	I	-	-

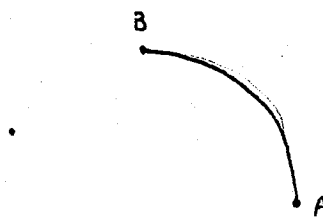
Toutes les trajectoires dans R_A sont des droites : il n'y a aucun problème pour les étudiants. En revanche, dans le référentiel de B, on trouve :

- 11,5 % des étudiants qui tracent une droite (↘) sans indiquer (sauf un) comment ils l'ont obtenue. Un étudiant, en effet, indique sur son schéma "la vitesse du caillou" et la vitesse d'entraînement (égale, dit-il, à $-v$ du bateau).

- 52,5 % tracent une trajectoire incurvée, toujours dans le même sens et telle que la vitesse du caillou lui soit tangente, même si celle-ci n'apparaît pas sur les schémas. En effet, on trouve :



(1/3 des étudiants)



(2/3 des étudiants)

Les justifications fournies se réfèrent au mouvement de l'un des observateurs :

"B se déplace par rapport au caillou et à lui-même".

"Pour B, A se déplace à vitesse constante dans l'autre sens".

"B avance, le caillou se tourne vers lui".

"Si on néglige les forces de pesanteur, B voit la pierre décrire une légère courbe car il avance".

"La trajectoire dans le repère du bateau est une branche semi-parabolique et je l'explique par le fait que le caillou se rapproche du bateau (car v du bateau)".

"B se déplace".

"Trajectoire pour A : on se place dans le repère fixe de la plage qui est le même que celui de A : le caillou va tout droit. Trajectoire pour B : je pense que la trajectoire du caillou est une parabole - intuitivement - je ne peux pas le démontrer".

Nous sommes loin des résultats des tests de la rivière : les trajectoires I sont plus nombreuses et les justifications fournies font intervenir le mouvement de l'un des observateurs. Un seul étudiant compose les vitesses pour tracer la trajectoire dans R_B , contrairement au problème de la rivière : les deux problèmes sont loin d'être équivalents.

b) Tests Q2

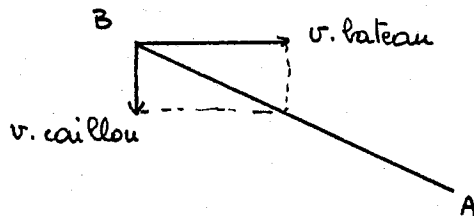
Le tableau IV résume les résultats.

Tableau IV

			Référentiel de A (R_A)		
% des réponses			D	I	Pas de traj.
Référentiel	(58 %)	D	29	23	6
de B (R_B)	(28 %)	I	28	-	-

Les résultats se rapprochent davantage de ceux de l'expérience rivière. En effet :

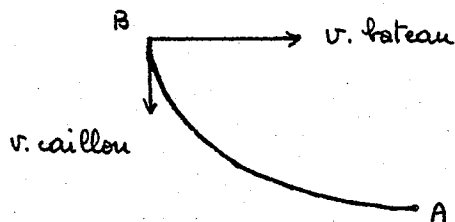
- 29 % tracent une trajectoire D dans R_A qui est obtenue à partir d'une composition des vitesses



Aucun commentaire n'accompagne ces schémas : apparemment, ils sont une justification en soi.

Ces étudiants, comme ceux des tests rivière, composent deux vitesses, contrairement à ceux de Q1 et Q1bis.

- 28 % tracent une trajectoire I dans R_A . Cette trajectoire est incurvée dans le sens de déplacement du bateau et est telle que la vitesse du caillou lui soit tangente,



Deux vitesses figurent encore sur ces schémas "la vitesse du bateau et celle du caillou", mais aucun ne compose ces vitesses entre elles. La courbure est justifiée par un étudiant : "la résistance de l'air intervient pour A". Deux ont parlé du vent, mais ont ensuite rayé cette partie de leur réponse. Ces tentatives d'expliquer la courbure par le vent, la résistance de l'air sont à rapprocher des justifications dynamiques observées dans l'expérience précédente. Cependant les éléments à notre disposition sont minces et il est difficile d'en tirer des conclusions claires.

- 28 % des étudiants enfin tracent une trajectoire I dans R_B et D dans R_A . C'est à ce niveau que les résultats divergent avec ceux de l'expérience rivière, où aucune trajectoire dans le repère de l'eau était incurvée.

La moitié trace une trajectoire droite dans R_A (\backslash), obtenue grâce à une composition des vitesses. Dans R_B , elle est incurvée car :

"A voit une droite résultante de la vitesse du bateau et de la vitesse du caillou lancé par B. B avance avec le bateau donc il ne peut voir une trajectoire rectiligne pour le caillou qu'il a lancé".

"Pour B, le caillou part avec une vitesse initiale. A partir de ce moment-là, sa vitesse décroît. Pour B, qui a une vitesse constante, il voit le caillou aller moins vite et tracer une courbe".

"Pour B, c'est A qui se déplace, la trajectoire est une courbe".

"Les trajectoires sont différentes car, pour B, A s'est déplacé entre le moment où lui-même a lancé le caillou et celui où A a reçu le caillou (pour A, cela n'avait aucune importance que B se déplace ou non".

Selon les étudiants, B, dans son référentiel, est mobile et la courbure est due au mouvement de B ou bien B est immobile dans son référentiel et la courbure est due au mouvement de A. La courbure est attribuée au mouvement de l'un des observateurs.

L'autre moitié n'a pas tenu compte de l'entraînement : la trajectoire est droite dans R_A (\downarrow) car seule la "vitesse du caillou" est prise en compte :

"Pour que le caillou touche A, il faut que B lance le caillou lorsqu'il est juste en face de A".

La trajectoire dans R_B est encore incurvée mais dans le sens de déplacement opposé à celui du bateau car "le bateau avance". Pour ces étudiants la situation de Q2 est équivalente à celle de Q1 et Q1bis.

II. RESULTATS SUR LES DISTANCES PARCOURUES

La question posée est formellement la même pour tous les tests : la distance parcourue par le caillou quand il va d'un observateur à l'autre est-elle la même ou différente pour les deux observateurs ?

Pour Q1, la question est directe en ce sens que les distances

parcourues demandées peuvent se déduire des trajectoires tracées à la question précédente.

Pour Q2 et 1bis, la question est indirecte en ce sens que les étudiants ont tracé les trajectoires pour un trajet aller du caillou et la question porte sur le trajet retour. Les résultats sont indiqués dans le tableau V.

Tableau V

Réponses aux distances parcourues (en pourcentage)

	Distance parcourue		
	\equiv	\neq	Pas de réponse
Question directe Q1 (N = 42)	50 %	45 %	5 %
Question indirecte Q2 et 1bis (N = 45)	65,5 %	27 %	7,5 %

Le pourcentage de réponse "c'est la même" est élevé dans chacun des tests, cependant on constate que le pourcentage de réponse "ce n'est pas la même" est plus grand lorsque la question posée est directe. Il s'agit de savoir si d'avoir construit les trajectoires correspondant aux trajets a une influence sur les réponses. Le tableau VI donne la répartition des réponses sur les distances en fonction des réponses sur les trajectoires. Dans ce tableau, n'apparaissent pas les étudiants qui ont répondu à l'une des deux questions.

Tableau VI (en population)

Question directe	D		Question indirecte	D	
	\equiv	\neq		\equiv	\neq
Trajectoire \equiv	10	3	Trajectoire \equiv	8	5
Trajectoire \neq	11	16	Trajectoire \neq	20	7

On constate que le nombre d'étudiants ayant répondu d'un côté "distances et trajectoires différentes" augmente d'un test à l'autre (17,5 % à Q1bis et Q2) et de l'autre côté "distance identique et trajectoires différentes" diminue d'un test à l'autre (50 % à Q1bis et Q2 et 27,5 % à Q1). Mais ces pourcentages concernent des populations très faibles, aussi ne sont-ils pas statistiquement significatifs. En revanche on note des différences au niveau des justifications : 95 % des étudiants de Q1bis et Q2 justifient leur réponse contre seulement 33 % à Q1. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, on trouve, dans Q1, très peu de justifications correspondant aux couples de réponses "trajectoires et distances identiques" et "trajectoires et distances différentes" : deux étudiants seulement font intervenir les trajectoires dans leur argumentation. Par ailleurs, le nombre d'étudiants justifiant la réponse "distances différentes" est deux fois moins élevé à Q1 qu'aux autres tests, alors que pratiquement deux fois plus d'étudiants ont donné cette réponse à Q1 qu'aux autres tests.

Cet ensemble de faits indique que certains étudiants de Q1 se sont trouvés confrontés à des difficultés qu'ils n'ont pas toujours réussi à résoudre. Deux étudiants de Q1 font une composition des distances, l'une étant appelée réelle, l'autre apparente ; bien que cette composition soit faite par certains étudiants de Q1bis et Q2, cette distinction n'apparaît jamais.

Trois étudiants enfin n'arrivent pas à donner une réponse claire : ils remplissent une demi-page et s'aperçoivent qu'ils se contredisent d'une ligne à l'autre. En effet, ils répondent tout d'abord à une autre question (comparaison des durées pour aller de $A \rightarrow B$ et de $B \rightarrow A$), sans s'en apercevoir, puis réalisent qu'ils raisonnent sur des durées et non sur des distances. Ils réalisent ensuite qu'ils répondent à une autre question (comparaison des deux trajets) et finissent par abandonner. Il ressort de leur discours qu'ils supposent implicitement que les distances parcourues sont invariantes par changement de référentiels. Ce type de discours n'est pas observé avec les autres tests.

En revanche, un étudiant a trouvé la solution :

"la distance est la même ; ce sont les référentiels choisis qui font paraître les trajectoires différentes".

Et c'est au fond l'avis général. En effet, bien que les trajectoires soient différentes, les distances parcourues sont identiques ; les justifications fournies rejoignent alors celles de leurs camarades des tests Q1bis et Q2 :

"C'est une valeur inchangeable" (Q1bis)

"C'est indépendant des repères" (Q1, Q2 et Q1bis)

"Le temps est le même, donc la distance est la même" (Q1, Q2, Q1bis)

"C'est la même parce que $AB = BA$ " (Q2)

"C'est la même parce que dans un cas A est fixe et B bouge dans l'autre c'est le contraire" (Q2)

"La distance entre A et B varie au cours du temps mais la distance est la même car le caillou se déplace dans un repère fixe indépendant du bateau" (Q1, Q2)

"Puisque le bateau avance, B lance la pierre à $t = 0$; mais au moment où A la reçoit, B a avancé d'une certaine distance. Donc la distance n'est pas la même mais en fait je pense que la distance est la même" (Q1)

"Pour n'importe qui, la distance entre deux points ne bouge pas" (Q1)

"Bien sûr la distance est la même, éventuellement des effets de perspective peuvent jouer" (Q2)

"La distance ne varie pas quelle que soit la position de l'observateur" (Q1bis)

"La distance est la même car on peut arrêter B quand il reçoit le caillou (Q1)
il lance le caillou (Q2 et Q1bis)"

"Cela ne change pas qu'elle soit vue différemment par des personnes situées différemment" (Q1bis)

"Parce que A reçoit le caillou" (Q2).

Il ressort de ces commentaires et de ces résultats que la majorité des étudiants est persuadée que la distance parcourue est indépendante du référentiel. Le fait d'avoir tracé auparavant les trajectoires ne les aident guère pour répondre aux distances parcourues. Il ne semble pas que celles-ci soient évaluées à partir des trajectoires correspondantes. La distance parcourue est une distance qui relie les deux points matérialisés (en ligne droite et

non par un trajet incurvé) ; ces deux points étant supposés fixes, la distance devient une "donnée" indépendante du mouvement des observateurs.

III. REPOSES SUR LA DUREE DES TRAJETS

La question suivante a été posée aux 35 étudiants de Q2 :

"Ce caillou, ainsi, a quitté B pour rejoindre A puis quitté A pour rejoindre B. Est-ce que le temps mis par ce caillou pour faire le trajet aller et le temps mis pour faire le trajet retour sont les mêmes ou différents ?". Justifier.

L'énoncé ne permet pas de répondre à cette question puisqu'il manque des données.

Sur les 32 réponses recueillies, 13 étudiants mentionnent qu'il manque des données :

- . 5 ne peuvent répondre car ne connaissent rien sur
 - la vitesse à laquelle A relance le caillou (3)
 - les positions relatives de A et B (2)
- . 8 supposent que "celui qui relance le caillou le relance avec la même force" ou encore que "les forces de lancement sont les mêmes". Tous ces étudiants parlent en terme de forces. On retrouve ce même phénomène aux questions précédentes :

"Pour B, la vitesse du caillou est la force réelle à savoir la force musculaire de B" (commentaire accompagnant une trajectoire).

Cette absence de données n'empêche pas la plupart des étudiants de répondre à la question posée. Parmi ces réponses, on trouve :

- . 50 % des étudiants qui raisonnent uniquement sur la longueur des trajets
- . 14 % qui raisonnent uniquement sur les vitesses
- . 36 % tiennent compte de ces deux grandeurs physiques.

A part le fait que l'on retrouve un nombre élevé de justifications

à un seul élément, comme pour l'expérience rivière, on s'aperçoit que l'élément déterminant est de loin la longueur des trajets, longueur, notons-le, qui n'est, pas plus que les vitesses, définie dans un référentiel.

Enfin, beaucoup d'étudiants ne font aucun dessin : aussi est-il difficile de savoir quelles distances ils ont considérées. Ceci étant, on trouve, parmi les réponses accompagnées de schémas, des distances définies apparemment dans le référentiel des berges alors que la vitesse n'est pas définie dans le même référentiel pour les deux parcours. Là encore, aucun étudiant n'est gêné par le fait de combiner des grandeurs définies dans des référentiels différents.

CHAPITRE III

INTRODUCTION

Des expériences décrites au chapitre précédent nous allons chercher à dégager les éléments de ce qu'on peut appeler une cinématique naturelle ou "spontanée" par opposition à la cinématique du physicien. On verra que ces deux cinématiques diffèrent assez fondamentalement et conduisent sur certains points à des résultats contradictoires ; il est donc important de connaître cette cinématique naturelle pour comprendre le comportement d'un étudiant devant un problème de cinématique, le pourquoi de certaines erreurs, la nature des incompréhensions et des difficultés qu'il rencontre et finalement la façon dont on peut espérer en améliorer l'acquisition et la maîtrise.

Pour simplifier la terminologie, nous désignerons dans la suite par modèle naturel cette cinématique spontanée et par modèle cinématique la théorie du physicien. "Naturel" ou "spontané" signifie seulement qu'il ne s'agit pas d'un acquis de type scolaire, mais d'une façon de comprendre le réel qui se développe "naturellement" pour répondre à des problèmes rencontrés dans la vie quotidienne. Bien entendu, ce modèle naturel est fortement dépendant du contexte culturel général. En particulier on ne saurait ignorer ses relations avec la pensée scientifique du moment et son évolution historique. Nous nous efforcerons plus loin de dégager quelques-uns de ces liens. Il en résulte aussi que le modèle naturel, contrairement au modèle cinématique, n'a aucune prétention universelle, et qu'il pourrait fort bien être différent, au moins en partie, s'il était analysé dans d'autres cadres culturels : nous ne l'exporterions pas sans précaution.

L'emploi du même terme de modèle pour le naturel et le cinématique ne doit pas dissimuler un certain nombre de différences essentielles entre les deux. Le terme de modèle naturel s'applique essentiellement à la construction, que nous allons présenter, d'un ensemble de règles et de relations généralement non formulées qui constituent la cinématique naturelle. C'est nous qui explicitons ce modèle à titre de système de pensée cohérent, à partir d'éléments convergents mais souvent partiels ou disparates : on ne saurait donc rencontrer ce modèle à l'état pur chez tel ou tel individu. Dans la population d'étudiants auxquels nous nous sommes intéressés, une partie du modèle acquis de type cinématique se mélange toujours au modèle naturel. Ce dernier est en quelque sorte un cas limite et l'étudiant se situe quelque part entre lui et l'autre pôle que constitue le modèle cinématique. Cependant le modèle naturel est suffisamment fort pour qu'on en retrouve des éléments un peu partout, y compris dans les discours oral ou écrit des physiciens de métier.

En dehors de leurs contenus spécifiques, les modèles cinématique et naturel se distinguent par des caractéristiques très générales. Le modèle cinématique est unique purement descriptif, très simple formellement, facile - en principe - à appliquer de façon systématique pourvu qu'on s'en tienne strictement à ses règles ; mais les situations qu'il permet de décrire peuvent être difficiles à imaginer : la coordination des mouvements d'un même objet dans deux référentiels différents se traduit difficilement en images et l'opération devient difficile, parfois même impossible, dès qu'il s'agit de plusieurs objets. Enfin tout ce qui est causal est étranger à la cinématique, et relève de la dynamique : l'explication est ici purement formelle, structurelle, dirait-on, elle repose sur l'existence de lois de composition et d'invariants.

Au contraire, le modèle naturel est double, à la fois descriptif (A se déplace par rapport à B) et explicatif (pourquoi A se

déplace). Il en résulte un modèle compliqué dans lequel il y a beaucoup de relations entremêlées qui sont utilisées le plus souvent au coup par coup et ne conduisent pas à des vues synthétiques. A l'inverse, il est facile d'imaginer les mouvements des objets tels qu'ils sont décrits dans le modèle naturel. Cette facilité de représentation est sans doute un élément essentiel pour expliquer la constitution du modèle naturel. Ce n'est pas le seul : nous verrons qu'on y rencontre des lois de composition et des invariants qui fondent la cohérence du modèle et assurent sa stabilité.

I. LE MODELE CINEMATIQUE

Avant de décrire le modèle naturel, rappelons, en quelques mots, le modèle cinématique de la relativité galiléenne.

Un évènement quelconque est repéré par quatre coordonnées (xyzt). Ce repérage nécessite un "système de référence", appelé aussi référentiel ou repère. La terminologie est un peu floue : le terme repère est parfois limité à l'espace seul, parfois il englobe les coordonnées d'espace et de temps. Les systèmes de références théoriques sont, en principe, matérialisables sous forme d'un ensemble de règles (mètres) et d'horloges rigidement liées entre elles et indéformables, auxquels le physicien ajoute souvent un "observateur", c'est-à-dire celui qui est censé effectuer les mesures. D'où les expressions telles que "dans le repère de l'observateur X" ou "pour l'observateur X". Il est clair que ce terme d'observateur est sans rapport avec quelque subjectivisme. Il ne renvoie pas non plus à une géométrie liée à une vision binoculaire dans laquelle interviennent parallaxe, déformation par éloignement, etc. "Pour l'observateur X" signifie donc seulement qu'il y a nécessité de préciser le repère matériel par rapport auquel est repéré tel évènement.

Bien entendu il existe une infinité de coordonnées différentes pour le même évènement. Le problème de la cinématique est de relier entre eux ces repérages. En cinématique classique, on y parvient grâce aux deux règles suivantes :

$$\begin{cases} \vec{OM} = \vec{OO'} + \vec{O'M} \\ t = t' \end{cases}$$

(lorsque les horloges ont été synchronisées)

Ceci conduit à des règles d'invariance et des lois de composition. Sont invariantes par changement de référentiels les durées et les longueurs ou distances instantanées. Les distances parcourues entre deux instants et les vitesses satisfont aux relations suivantes, pour des référentiels en translation :

$$\begin{cases} \vec{d}_{0_1}(M) = \vec{d}_{0_1}(0_2) + \vec{d}_{0_2}(M) \\ \vec{v}_{0_1}(M) = \vec{v}_{0_1}(0_2) + \vec{v}_{0_2}(M) \end{cases}$$

On peut ainsi relier entre elles les grandeurs cinématiques mesurées dans deux référentiels et déduire de la trajectoire d'un mobile dans un référentiel celle qu'il suit dans un autre.

Bien entendu, les définitions des grandeurs cinématiques sont indépendantes des référentiels : la vitesse est, dans chaque référentiel, le rapport de la distance parcourue à la durée de parcours, de sorte que la vitesse instantanée est toujours tangente à la trajectoire.

Ces quelques éléments suffisent pour décrire tous les mouvements et expliquer les transformations d'un référentiel à l'autre, donc d'un observateur à l'autre.

Qu'on puisse avoir des points de vue différents sur le même évènement n'a jamais fait problème pour personne. Cependant les quelques résultats que l'on vient de rappeler ont mis des siècles à être construits et ont dû être remplacés ultérieurement par la cinématique relativiste. C'est dire que le problème posé est plus complexe qu'il n'y paraît. En particulier, on pourrait croire que la notion de référentiel est simple. Il n'en est rien : parler de règles rigides ou d'horloges transportables supposent bien des hypothèses sur les lois de la physique qui sortent du cadre restreint de la cinématique. La tendance—qui est celle de l'enseignement, hormis celui de la relativité—, à ne voir dans un problème de cinématique qu'une description élude ainsi des problèmes de fond qui se sont posés depuis Aristote. Nous aurons l'occasion d'y revenir.

Lorsqu'on veut expliquer et non plus seulement décrire le mouvement, il faut faire appel à la dynamique. Celle-ci ne peut être développée que sur la base d'une cinématique, établie préalablement et de façon autonome, et se trouve totalement modifiée avec tout changement de cinématique (voir le passage à la relativité). Le point important ici est que la cinématique est, comme modèle descriptif, totalement autonome par rapport à la dynamique, même si le choix de telle ou telle cinématique pour représenter le monde physique n'est pas, lui, indépendant de l'ensemble des lois de la physique, y compris de dynamique. En particulier, les définitions de la vitesse et de l'accélération sont sans rapport avec l'étude des causes du mouvement : il n'y a pas besoin de savoir pourquoi un mobile a une vitesse pour déduire celle-ci de son "équation horaire" ou trouver sa trajectoire dans un référentiel si on la connaît dans un autre. Ce point est crucial pour la suite car le modèle naturel ne se laisse pas séparer ainsi en cinématique et dynamique, chacune traitant des problèmes différents, mais au contraire mêle étroitement ces deux aspects, comme on l'a vu sur des exercices de "pure" cinématique que nous avons analysés dans le chapitre précédent.

II. LE MODELE NATUREL

Le modèle naturel se présente comme un mélange de descriptions et d'explications : il s'agit tout à la fois de dire comment un objet se déplace par rapport à son environnement et pourquoi cet objet se déplace. Nous étudierons successivement ces deux aspects, mais peut-être vaut-il mieux le redire : dans les faits, ces deux aspects sont étroitement imbriqués, un étudiant passe souvent de l'un à l'autre ou utilise les deux en même temps. C'est uniquement pour la clarté de l'analyse que nous les distinguons. Nous nous efforçons de donner tout au long de cet exposé des justifications issues des expériences déjà rapportées ; cependant certaines hypothèses ne sont justifiées que par leurs conséquences à l'intérieur d'un ensemble cohérent. Cette cohérence est essentielle pour justifier le terme de "modèle naturel", et pour comprendre pourquoi ce modèle est si répandu et si stable.

A. ASPECT EXPLICATIF DU MODELE NATUREL : DYNAMIQUE DU MOUVEMENT

L'aspect explicatif est fortement lié à un aspect dynamique du mouvement en faisant intervenir les causes physiques de celui-ci. C'est en s'appuyant sur les résultats bruts concernant les vitesses et sur leurs propriétés vis-à-vis des changements de référentiels que nous le mettrons en évidence.

1. La vitesse est-elle une grandeur relative ?

La première question à régler - dont dépendent toutes les autres - est de savoir ce qu'est une vitesse. S'agit-il d'une

grandeur relative qui ne peut être définie qu'en relation avec d'autres objets ?

On a constaté, à l'expérience rivière, que la vitesse d'un objet était toujours rattachée au moteur - cause motrice du mouvement de cet objet. Ceci ne doit pas surprendre, compte tenu de la forme de l'énoncé : celui-ci indique que "les deux bateaux identiques ont des moteurs également puissants", ou que "les nageurs (des jumeaux) nagent à la même vitesse en piscine". Il peut apparaître abusif, dans ces conditions, de déduire en particulier de la présence d'expressions du type "la vitesse du nageur, la vitesse du bateau" que ces vitesses sont rattachées au moteur et non au référentiel de l'eau alors que l'énoncé favorise la prise en compte du moteur. On peut faire la même remarque à propos de l'expression "la vitesse du courant", celle-ci étant peu ambiguë : il ne viendrait, en effet, à l'idée de personne de définir cette vitesse dans un autre référentiel que celui des berges. Il peut donc paraître arbitraire d'affirmer que les étudiants ne connaissent pas les référentiels dans lesquels ces vitesses sont définies.

Le problème est donc de savoir si l'étudiant, malgré cette absence de précision, raisonne comme le physicien et s'il conçoit que toute vitesse est relative, définie par rapport à d'autres objets ou observateurs. Supposons un instant que ce soit le cas : si, avec certaines situations, il peut paraître utile de préciser les référentiels, cela devient impossible avec d'autres. Or, qu'observe-t-on ?

A l'enquête préliminaire, on note un nombre élevé d'erreurs à l'exercice des lunettes et peu d'erreurs à celui du tapis roulant. On note aussi qu'aucun étudiant ne précise, dans tous les exercices, le référentiel dans lequel est définie la vitesse concernée.

Si, dans l'exercice du tapis roulant, on peut penser que la précision n'est pas nécessaire car les référentiels en jeu sont évidents et correspondent à ceux des observateurs, il n'en est pas de même avec l'exercice des lunettes puisqu'il y a alors trois référentiels en jeu (ceux des observateurs et celui de l'air). On devrait donc voir apparaître les repères : or c'est loin d'être le cas.

A l'expérience dépassement, 0,9 % des étudiants utilisent le terme de repère dans leurs réponses et leurs règles générales ; mais, fait surprenant, aucun des étudiants du test "mouvement-concret", où le critère sens des vitesses est majoritairement choisi, n'utilise ce terme : ils parlent de la vitesse des deux bateaux et raisonnent sur ces vitesses sans se préoccuper le moins du monde des référentiels.

A l'expérience caillou, les lancements par A (immobile sur la rive) et par B (sur un bateau en mouvement par rapport à la rive) sont traités de façon identique. Dans ce cas, personne ne se pose la question "vitesse par rapport à quoi", et pourtant cette précision est importante si l'on veut comparer les durées de parcours du caillou à l'aller et au retour.

A l'expérience rivière, à Q1 où l'on indiquait par une flèche "la vitesse du mobile", 0,7 % des étudiants posent la question "vitesse par rapport à quel repère ?". La moitié seulement fait un choix correspondant à la vitesse par rapport à l'eau. A Q3, où l'on demandait d'indiquer "le sens des vitesses des mobiles", 90 % répondent, mais seulement 1 % précisent les référentiels. En revanche, lorsqu'on remplace l'eau par un tapis roulant, bien que 68 % précisent les référentiels dans lesquels ils représentent les trajectoires, aucun ne le fait pour la vitesse et nombreux sont ceux qui combinent des grandeurs définies - en fait - dans des référentiels différents.

Ce rapide constat montre que le comportement de l'étudiant diffère de celui du physicien : plus la situation nécessite de préciser les référentiels, moins on les voit apparaître et moins les vitesses se transforment.

On constate, alors, que la vitesse dont parlent les étudiants n'est pas quelconque : elle est généralement associée à un moteur.

Ainsi, la vitesse du poisson est celle qu'il a grâce à ses muscles, la vitesse des lunettes en chute libre est celle que lui communique le moteur gravitation ("elles sont attirées par la terre"), les vitesses des bateaux, dans l'expérience dépassement, sont celles que leur communique leur moteur, la vitesse du caillou est celle que les muscles du lanceur lui donne, etc.

Notons, pour confirmation, que l'on ne rencontre aucun contre-exemple, c'est-à-dire aucune réponse d'un autre type : toutes les réponses fournies partent de la vitesse associée au moteur.

Parler de vitesse en ces termes ne nécessite aucunement de préciser le référentiel dans lequel elle est définie, puisqu'elle l'est en fait dans le référentiel du support du moteur. On peut alors se demander si le moteur ne privilégie pas un référentiel, celui du support du moteur. Nous avons été, au début de ce travail, tentés par cette interprétation et avons cherché à définir les caractéristiques des différents référentiels en jeu afin de pouvoir déterminer le référentiel implicite dans lequel l'étudiant raisonnait. Si celui de l'air pour les lunettes et le poisson (il s'agit d'un poisson volant), celui du tapis roulant pour le marcheur C, celui de l'eau pour les nageurs et les bateaux venaient naturellement à l'esprit, nous nous sommes alors trouvés dans l'incapacité de répondre à de nombreuses questions, dont les suivantes :

Pourquoi, à l'expérience dépassement (test MC), les étudiants acceptent-ils que le module de la vitesse change selon l'observateur et non son sens ?

Pourquoi, à l'expérience rivière, les étudiants obtiennent-ils les ordres d'arrivée de la même façon dans les cas de l'eau et du tapis roulant ? Pourquoi utilisent-ils, pour calculer les durées de parcours, des vitesses et distances parcourues définies, en fait, dans des référentiels différents ? Si le moteur privilégiait un référentiel, pourquoi en changer selon la grandeur physique ?

Pourquoi la vitesse transformée, reconnue exister principalement lorsque l'objet est entraîné par un mécanisme physique d'entraînement, n'est-elle plus utilisée pour calculer ces durées de parcours ?

Pourquoi, enfin, dans l'expérience caillou, les étudiants combinent-ils encore des grandeurs définies, en fait, dans des référentiels différents ? Si le moteur privilégiait un repère, on ne devrait pas trouver des réponses de ce type, or ces dernières sont très nombreuses.

Il a fallu se rendre à l'évidence : les référentiels implicites n'apparaissent jamais à travers les réponses, y compris pour celles qui sont correctes. Devant l'incapacité de donner des réponses satisfaisantes à cet ensemble de questions, il a bien fallu reconnaître que le moteur ne privilégiait pas un référentiel et que la vitesse n'était pas perçue comme une vitesse relative.

2. Qu'est-ce que la vitesse ?

Les résultats obtenus deviennent cohérents si l'on admet :

A.2a) la vitesse d'un objet est celle que lui communique son moteur

A.2b) cette vitesse est une propriété de l'objet, indépendante de l'existence des mouvements des autres objets, tout comme sa masse ou ses dimensions ;

ce qui implique :

A.2c) cette vitesse est la même pour tous les observateurs.

Un terme revient souvent sous la plume de l'étudiant, tout comme dans le langage courant, pour désigner cette vitesse : c'est celui de vitesse propre. Nous garderons cette terminologie qui marque bien l'appartenance à l'objet seul.

On comprend alors pourquoi c'est la vitesse propre qui est le plus souvent utilisée dans un calcul de durée de parcours : l'objet ayant une vitesse propre, indépendante de l'observateur, on ne voit pas pourquoi on en prendrait une autre.

C'est ce que l'on observe fréquemment dans l'expérience rivière, que l'étudiant ait ou non tracé une vitesse résultante : pour ceux-là, la vitesse propre est bien une propriété de l'objet, ne dépendant pas de l'observateur. Certains, cependant, utilisent la vitesse résultante dans leur calcul - ils sont peu nombreux - ; mais leurs justifications dynamiques et la forme de leur trajectoire ne s'expliquent que si la vitesse propre est comprise comme une

propriété de l'objet (cf. chapitre II, partie III). Il faut rappeler, à ce propos, que le modèle naturel ne décrit pas le comportement de chaque étudiant, pris individuellement, mais des tendances d'ensemble qui se retrouvent à différents niveaux.

De la même façon, dans l'expérience caillou, tous les étudiants répondant aux durées de parcours, supposent explicitement ou implicitement que "les vitesses ou forces de lancement" de A et B sont identiques : pour que les vitesses soient les mêmes dans les deux cas, il suffit que chacun des moteurs (les muscles des personnages) fonctionne de la même façon.

On comprend aussi pourquoi les étudiants n'utilisent jamais les référentiels pour les vitesses : cela devient parfaitement inutile, puisqu'il suffit de considérer le moteur, responsable du mouvement de l'objet. Cette définition de la vitesse est solide, claire et peu ambiguë : son seul défaut est de ne pas pouvoir rendre compte de certains phénomènes physiques. Les expressions du type "la vitesse de" ont maintenant un sens très précis et différent de celui que nous avons envisagé auparavant : elles indiquent que cette vitesse est une propriété de l'objet de la même façon que l'expression "le poids de la masse" indique que le poids est une propriété attribuée à la masse.

Pour définir le moteur, il faut savoir à qui il appartient et sur quoi il agit : tâche généralement aisée lorsque le moteur est inclus dans l'objet - comme celui d'une voiture ou d'un nageur -, mais qui peut mener parfois à des idées "fausses" du point de vue du physicien : le poids³ appartient au corps pesant beaucoup plus qu'à l'interaction entre deux masses et les effets du moteur "muscles du lanceur" sont transférés au caillou, qui s'approprie ainsi ce moteur.

Cette définition du moteur nous amène à distinguer deux cas différents : celui où la vitesse est communiquée à l'objet par son moteur propre (muscles, poids, etc.) et celui où la vitesse provient

d'un moteur extérieur à l'objet qui est en contact permanent avec lui.

En effet, dans l'exercice des lunettes de l'enquête préliminaire, on recueille des phrases du type (cf. Ch. I) : "la vitesse des lunettes lorsqu'elles sont tenues, c'est celle du para qui les tient, tandis que lorsqu'elles tombent en chute libre, les lunettes ont leur vitesse propre".

Il y a donc une différence entre :

A.2d) la vitesse propre communiquée au mobile par son moteur interne et la vitesse d'entraînement, due à un moteur extérieur à l'objet, restant en contact avec lui.

Cette distinction est justifiée par le fait que la vitesse d'entraînement, propriété du moteur d'entraînement et non de l'objet, disparaît avec le lien qui assure le contact entre l'objet et ce moteur.

C'est bien ce que l'on constate, dans l'expérience caillou : certains étudiants pensent que, pour atteindre A, B (sur un bateau) doit envoyer le caillou lorsqu'il est juste en face de A (sur la rive) car "le caillou, lorsqu'il a quitté B, n'a plus aucun contact avec le bateau".

Nous verrons d'autres confirmations de d) et ses conséquences ultérieurement, conséquences que nous pouvons résumer ainsi :

A.2e) La vitesse d'entraînement disparaît avec le lien qui assure l'entraînement.

Si notre hypothèse de départ est correcte, c'est-à-dire si le moteur crée une vitesse propre, il doit aussi créer un sens de déplacement propre, puisque ce sens est celui de la vitesse. Par conséquent, nous devrions avoir :

A.2f) le sens de déplacement est une propriété de l'objet indépendante de l'observateur.

Ce point est déjà apparu dans l'enquête préliminaire. Lorsque les lunettes tombent en chute libre, le sens du mouvement est celui de la force, du haut vers le bas. Il est inconcevable pour nombre d'étudiants que les lunettes puissent "remonter" pour l'un des observateurs (cf. les résultats, Ch. I).

C'est surtout l'expérience dépassement qui met ce point en évidence. On a vu que le critère "sens des mouvements" est majoritairement choisi pour décider quelles sont les descriptions des mouvements compatibles entre elles. Lorsque les mobiles sont des bateaux (ils possèdent donc un moteur), ce sens est explicitement déclaré invariant par changement de référentiels : "les vitesses doivent avoir le même signe, les bateaux doivent aller dans le même sens...". Lorsque le moteur s'impose (bateaux), il y a donc référence aux sens des mouvements ; lorsqu'il ne s'impose pas (mobile quelconque, "abstrait"), d'autres critères sont retenus. C'est bien le moteur qui crée un sens du mouvement et il ne peut évidemment aller en même temps vers la droite et vers la gauche.

On rencontre une version affaiblie de ce qui précède lorsque les étudiants acceptent éventuellement que le sens change d'un observateur à l'autre, à condition que les sens des déplacements des deux bateaux changent en même temps ; mais il n'est pas pensable que l'un change et pas l'autre. Un étudiant nous explique pourquoi : "on peut changer l'orientation de l'axe". Ce changement d'orientation de l'axe, sur lequel on représente les positions des bateaux, permet ainsi une unicité relative des sens des déplacements sans entamer l'unicité "réelle" de ceux-ci.

Notons, à ce propos, que les conclusions auxquelles est arrivée L. Viennot³ complètent et renforcent cet aspect du modèle naturel. Elle a montré qu'un mouvement devait avoir une cause compatible avec le sens de déplacement : si les forces d'interaction ne peuvent remplir cette fonction, il apparaît une force supplémentaire, le capital de force, attribuée à l'objet. Par exemple, une pierre lancée en l'air continue à monter alors que son moteur - le poids - tend à la faire descendre. Les étudiants introduisent une force supplémentaire (dont l'origine se trouve ici dans le geste du lanceur),

transférée à l'objet et qui sert de moteur aussi longtemps qu'il est nécessaire d'expliquer la montée. Pourquoi faut-il trouver une cause au sens de déplacement si celui-ci n'est pas une propriété intrinsèque de l'objet ? Par ailleurs, comme la cause d'un mouvement est indépendante de l'observateur, on en déduit que son effet l'est aussi et en particulier le sens de déplacement (le poids tire toujours vers la terre, vers le bas).

D'autre part, le sens des déplacements est également lié à la forme des objets en mouvement : un bateau a un avant et un arrière et son moteur lui-même est en "marche avant" ou en "marche arrière", mais pas les deux à la fois. De même aucun truquage ne permet de faire croire qu'un piéton recule lorsqu'il marche en avant. En somme le moteur polarise l'objet. On comprend aisément que l'effet soit moins fort, voire inexistant, lorsqu'il s'agit de "mobiles" sans plus, et encore plus lorsqu'il s'agit de "mobiles ponctuels".

Certains noteront enfin que si cet aspect du modèle explique pourquoi, dans l'expérience de dépassement, les sens des vitesses sont intrinsèques, il n'explique pas pourquoi les modules des vitesses peuvent avoir des valeurs différentes selon les observateurs. Ce résultat apparemment contradictoire avec ce qui précède, ne l'est, en fait, pas : nous y reviendrons lors de l'étude de l'articulation entre mouvements "réels" et "apparents" qui fait intervenir l'autre aspect du modèle naturel, l'aspect descriptif, dont nous n'avons pas encore parlé. Il faut rappeler que la séparation réalisée ici est artificielle et que, dans les faits, les deux aspects interfèrent en permanence.

3. Relation moteur-mouvement

L'ensemble des propriétés que nous venons de décrire montre et confirme que la notion de vitesse n'est pas définie comme vitesse par rapport à des observateurs (ou référentiels) mais à partir de sa cause physique : le moteur. Celui-ci devient alors

une propriété de l'objet, tout comme sa masse, ses dimensions, sa couleur... Rappelons que ce moteur - au sens cause motrice du mouvement de l'objet - n'est pas toujours inscrit dans la configuration de celui-ci, comme on l'a vu pour le poids et le caillou.

Ce moteur qui crée une vitesse propre risque de créer un mouvement propre défini par l'état de marche de son moteur. On est donc tenté de définir deux catégories dans lesquelles tout objet pourrait être rangé :

- A.3a) le moteur est arrêté ou l'objet n'a pas de moteur identifiable : l'objet est dit fixe, immobile, arrêté
- A.3b) le moteur est en état de marche : l'objet est alors mobile, en mouvement.

Ces deux catégories semblent banales car c'est ainsi que tout le monde s'exprime. N'avons-nous pas, dans l'énoncé de l'exercice du tapis roulant, écrit que : "A est arrêté sur le trottoir (est donc fixe), B est accoudé à la rampe du tapis (est en mouvement) et C marche sur le tapis (est mobile) ? Mais si le moteur crée un mouvement intrinsèque, il devrait devenir difficile d'accepter qu'un objet soit en même temps arrêté - ou immobile - et en mouvement puisque son moteur ne peut pas être à la fois arrêté et en marche. Si le mouvement propre n'est pas défini par rapport à d'autres objets, mais par rapport à l'état de fonctionnement de son moteur, les deux propositions "être arrêté" ou "être en mouvement" ne devraient pas être équivalentes.

L'enquête préliminaire est très révélatrice de cette dichotomie : bon nombre d'étudiants refusent de reconnaître que les lunettes tenues par un parachutiste sont fixes pour ce dernier, "puisque'elles bougent avec le parachutiste". D'autres refusent de croire qu'un voyageur assis dans un train est immobile dans le référentiel du train, "puisque'il bouge avec le train". L'immobilité ou la fixité n'est donc pas définie par rapport à quelque chose, mais de façon intrinsèque. De même les étudiants ne voient pas ce qu'il y a de commun entre les exercices 2 (lunettes) et 3 (tapis roulant)

qui leur permettrait de donner des réponses identiques aux questions portant sur les vitesses puisque, dans l'exercice 2 "aucun observateur n'est fixe, contrairement à l'exercice 3". De même, dans cet exercice, les contre-exemples particulièrement efficaces sont ceux pour lesquels on "arrête" l'un des observateurs (en accrochant, par exemple, l'un des parachutistes à un hélicoptère qui fait du sur-place).

Ces contre-exemples soulèvent une autre question : pourquoi les étudiants se corrigent-ils aussi facilement lorsqu'on arrête l'un des observateurs ? Là encore, nous étudierons ce problème plus loin, lorsque nous en viendrons à parler de mouvements réels et apparents.

Nous venons de voir que la prise en compte de ce moteur - au sens large - conduit les étudiants à considérer la vitesse comme une propriété intrinsèque de l'objet, mais ce sort n'est pas réservé uniquement à la vitesse. En effet :

A.3c) la distance parcourue est une propriété de l'objet : elle est donc indépendante de l'observateur.

Que la distance parcourue par un objet soit indépendante de l'observateur est une propriété très générale aux multiples origines, et dont on reparlera longuement dans le cadre de l'aspect descriptif. Dans certains cas, le moteur en est l'incontestable responsable : on peut fort bien concevoir que la distance parcourue par un poisson qui saute hors de l'eau (enquête préliminaire) relève uniquement des performances des muscles du poisson et non des observateurs. De même, les performances humaines expliquent la distance parcourue en un pas : un enfant et un adulte ne parcourent pas, en un pas, la même distance. Si le moteur n'est pas le seul responsable (la taille intervient évidemment dans le dernier exemple), il renforce le caractère d'invariant qu'ont les distances parcourues, ainsi qu'on le verra plus loin.

4. Combinaison de moteurs - vitesse et force

Toutes les situations où l'objet est entraîné par un moteur extérieur conduisent, dans la plupart des cas, à reconnaître l'existence d'un mouvement résultant.

C'est bien ce que nous avons observé dans l'enquête préliminaire : à l'exercice du tapis roulant où A est arrêté sur le quai, B sur le tapis et C marche sur le tapis, les étudiants disent (cf. Ch. I) : "il y a la vitesse du tapis et la vitesse de C. Pour B, C a sa vitesse propre et pour A, sa vitesse propre plus celle du tapis".

On notera en passant que la combinaison s'effectue également sur les distances parcourues. Un certain nombre d'étudiants - mais pas tous - affirment : "Pour B, la distance parcourue par C en un pas est celle d'une enjambée ; pour A, il s'agit de la longueur d'une enjambée plus la distance parcourue correspondante au trajet du tapis roulant pendant ce temps".

On reconnaît ici certaines compositions des vitesses et des distances parcourues, mais cette composition résulte des effets conjugués des deux moteurs et non d'un raisonnement cinématique, cette combinaison préservant le caractère intrinsèque des deux mouvements propres. Chaque moteur garde son individualité : on peut arrêter l'un et pas l'autre, annuler l'une ou l'autre des vitesses correspondantes : c'est ce que révèlent les justifications accompagnant les trajectoires tracées dans le référentiel de l'eau (cf. expérience rivière, Ch. II, partie III, p. 74). On trouve confirmation de cette combinaison - et non composition - dans les autres expériences et dans le quotidien :

Dans l'enquête préliminaire, le contre-exemple où l'on fait marcher un personnage C', à côté du tapis et donnant la main à C, a permis de faire prendre conscience que C' devait "marcher plus vite que C" ; mais pour C', la vitesse de C n'est pas nulle, puisqu'elle est selon les étudiants la vitesse propre ou la vitesse résultante.

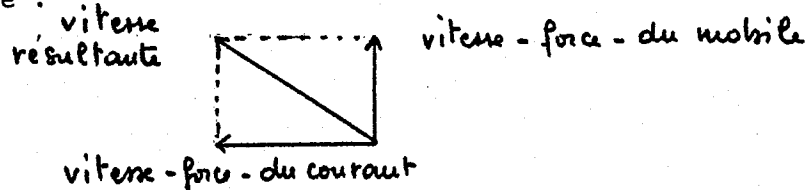
Lors d'une séquence de dessins animés "Momo et Ursule"* , on voit Ursule conduire une voiture. A la fin de la séquence, un magicien leur donne un tapis volant, à peine plus long que la voiture : on voit alors la voiture (préalablement mise en marche) sur le tapis, ce qui n'empêche nullement de faire dire

* Dessins animés passant à la Télévision Française.

à Ursule : "c'est chouette, comme cela on va plus vite". Les effets des deux moteurs sont purement et simplement additionnés.

Enfin, l'indifférenciation partielle entre vitesse et force qui apparaît principalement lorsque les étudiants combinent les effets des deux moteurs illustre bien ce que signifie cette combinaison, qui est loin d'être une composition de vitesses au sens de la cinématique. L'expérience rivière en fournit de nombreux exemples. La terminologie est interchangeable : on parle indifféremment de vitesse ou force du moteur, de vitesse ou force du courant. Ceci est conforme au langage quotidien : on dit d'un courant "qu'il est fort", d'où l'on glisse à "un courant qui a de la force", puis "à la force du courant" ; de même, un vent qui souffle à 100 Km/h. est un vent "fort" et non "rapide".

On a rencontré (cf. Ch. II, p. 98) de nombreux schémas du type :



où apparaissent indifféremment, et à un ou deux endroits, les termes de vitesse et de force.

Par exemple, une trajectoire droite, obtenue par une composition vectorielle des vitesses, est justifiée ainsi : "la trajectoire résulte de l'action conjointe de la force du moteur et de celle du courant".

De même, les justifications pour l'ordre d'arrivée des mobiles font explicitement intervenir les notions de force et d'effort : "l'un des nageurs est emporté", "il se fatigue moins", "il fait moins d'effort", tandis que l'autre "lutte", "doit vaincre le courant", "fait plus d'effort". Le moteur du bateau joue le même rôle, sa puissance sert dans un cas à vaincre le courant, tandis qu'il l'aide dans l'autre cas.

Tout ceci est encore à rapprocher des travaux de L. Viennot³ qui mettent en évidence une relation $F = \alpha(v)$, apparaissant principalement lorsqu'il faut expliquer un mouvement connu alors que les causes connues (forces d'interaction) ne l'expliquent pas. Ici, le contexte est différent car il s'agit d'un problème de cinématique pour lequel les vitesses en jeu sont uniformes et pour lequel le

mouvement résultant - non connu - est à déterminer. On voit apparaître des forces, et la vitesse résultante est obtenue à partir d'une composition des effets des deux moteurs identifiables qui ressemble à la détermination d'une résultante de forces. Toutefois, ces notions de vitesse et de force sont tellement imbriquées - tant au niveau du langage que de leurs propriétés - qu'il est difficile d'affirmer que l'une constitue un point de départ plus privilégié que l'autre. Cependant l'ensemble de ces résultats se complète : tout moteur crée un mouvement et à tout mouvement il faut un moteur, ces deux aspects s'appuyant mutuellement l'un sur l'autre pour renforcer la relation générale moteur-mouvement.

D'autres résultats confirment cette compréhension de la composition des vitesses que l'on peut résumer ainsi :

A.4a) le mouvement résultant représente la combinaison des effets du moteur propre et du moteur d'entraînement.

En effet, elle disparaît avec la suppression du lien matériel qui assure l'entraînement et il n'y a plus, dans ce cas, d'effet résultant : on retrouve ici une confirmation de A.2e.

C'est ainsi qu'à l'enquête préliminaire, on a vu qu'il n'y a pas composition : le poisson n'a qu'une seule vitesse puisque "lorsque le poisson est hors de l'eau, il n'est plus entraîné par le courant". Et si, à l'exercice 3 de la même enquête, une mouche vole en permanence à la verticale de C, elle est alors considérée comme parcourant la même distance pour les deux observateurs, même s'il n'en est pas de même pour C.

On retrouve, en partie, le même phénomène dans l'expérience caillou. Lorsque c'est A qui lance le caillou, aucun étudiant - à une exception près - ne compose la vitesse de lancement à celle de A par rapport à B pour obtenir la vitesse du caillou par rapport à B. En revanche, lorsque c'est B qui lance le caillou, un certain nombre d'étudiants combinent les vitesses de lancement et de B (vitesse propre) pour obtenir la vitesse par rapport à A. Bien entendu cette combinaison est limitée par le fait que l'entraînement cesse avec le lancement, ce qui conduit certains, on l'a déjà vu, à ne tenir compte

que de la vitesse de lancement. Néanmoins, la forte dissymétrie des deux cas est caractéristique : s'il n'y a qu'un seul moteur, il n'y a aucune composition, tandis que deux moteurs peuvent parfois - pas toujours - y conduire.

On peut formuler autrement la non-composition des vitesses en absence de lien physique entre l'objet et le moteur d'entraînement.

A.4b) Le mouvement d'un objet n'influe pas sur le mouvement d'un autre objet qui ne lui est pas lié.

5. Conclusion

L'aspect explicatif du modèle naturel découle donc d'une relation extrêmement puissante entre moteur et mouvement, que l'on peut résumer ainsi :

Le mouvement d'un objet est entièrement déterminé par la cause motrice - le moteur - qui le crée. Ainsi :

- si l'objet ne possède pas de moteur ou si son moteur est arrêté, cet objet est fixe

- si l'objet, sans moteur ou moteur arrêté, est entraîné par un moteur extérieur, il acquiert un mouvement - et donc une vitesse - d'entraînement qui existe tant que le contact matériel entre l'objet et le moteur d'entraînement n'est pas rompu

- si l'objet possède un moteur en fonctionnement, il possède un mouvement - et donc une vitesse propre qui est une propriété intrinsèque de l'objet, au même titre que sa couleur, sa masse... Ce mouvement n'est donc pas altéré par les mouvements propres des observateurs et devient indépendant de ces observateurs

- si l'objet possède un moteur propre non arrêté et si, en même temps, il est entraîné par un moteur extérieur, il apparaît un mouvement résultant qui ne subsiste, là encore, que si le contact entre l'objet et le moteur extérieur est maintenu. Ce mouvement n'est pas une propriété du seul objet puisqu'il fait intervenir un moteur extérieur.

Tout ceci entraîne le caractère intrinsèque de la vitesse, l'unicité des sens des déplacements et des distances parcourues, et une indifférenciation partielle entre vitesse et force.

Comme nous avons été amenés à l'expliciter de nombreuses fois, cet aspect du modèle naturel ne permet pas de rendre compte, à lui seul, de tous nos résultats car il est en permanence entremêlé avec un autre aspect de ce modèle, l'aspect descriptif, que nous allons expliciter maintenant.

B. ASPECTS DESCRIPTIFS DU MODELE NATUREL : GEOMETRIE DU MOUVEMENT

L'aspect descriptif concerne toutes les propriétés du mouvement qui s'analysent comme changement de position ou déplacement par rapport à d'autres objets. Lorsqu'on voit des objets se déplacer les uns par rapport aux autres, on peut aussi bien s'intéresser à la description des changements de position relative et des dépassements qu'à leurs causes. Les trajectoires, les distances parcourues relèvent de la description autant, sinon plus, que de l'explication. Il n'est donc pas surprenant de rencontrer dans le modèle naturel une large part descriptive, tout comme dans le modèle cinématique.

1. Le mouvement comme déplacement d'un point à un autre

Pour définir la vitesse propre, il n'est pas nécessaire de se préoccuper d'emblée des changements de positions et, en particulier, des points de départ et d'arrivée, puisqu'il suffit d'identifier le moteur de l'objet et de connaître son état de fonctionnement. En revanche, lorsqu'on s'intéresse aux distances parcourues, on est bien obligé de tenir compte des différentes positions de l'objet. Le problème est de savoir si ces positions sont relatives, c'est-à-dire définies par rapport à d'autres objets.

L'ensemble des résultats décrits dans le Chapitre II indique que les distances parcourues se transforment difficilement par changement de référentiels. Le problème est de savoir si, là encore, ces distances sont obtenues à partir des positions relatives ou si, comme pour les vitesses, elles sont définies de façon intrinsèque.

Les justifications fournies se référant souvent aux points de départ et d'arrivée, nous allons tout d'abord essayer de comprendre leur importance et leur rôle. Dans nos expériences, nous rencontrons deux types de situations :

a) Les points de départ et d'arrivée sont matérialisés par des objets qui sont immobiles l'un par rapport à l'autre ; la distance qui les sépare, dans le référentiel où ils sont au repos, ne varie pas au cours du temps. C'est le cas dans l'expérience rivière où le mobile quitte un point d'une rive pour atteindre un point de la rive opposée, et dans l'enquête préliminaire où C quitte J_1 pour rejoindre J_2 (J_1 et J_2 sont deux personnages immobiles sur le tapis).

Avec le problème de la rivière, les étudiants utilisent principalement la distance parcourue définie, pour le physicien, dans le référentiel des berges.

Dans l'enquête préliminaire, de nombreux étudiants reconnaissent que la distance parcourue par C en un pas est différente pour les deux observateurs alors que pour aller de J_1 à J_2 elle est déclarée identique.

On pourrait penser que les étudiants se placent implicitement dans le référentiel de ces points, c'est-à-dire le référentiel terrestre pour la rivière et celui du tapis pour l'enquête préliminaire.

De même, lorsqu'un étudiant de l'enquête préliminaire, à l'exercice du poisson, nous dit :

"Un poisson qui saute de l'eau fait un rond à la sortie et un autre quand il rentre dans l'eau, et la longueur de son saut est celle qui sépare ces deux ronds. Alors vous ne me ferez pas croire qu'ils peuvent être à une certaine distance ou au même endroit selon l'observateur"

il semble raisonner dans le référentiel de l'eau. Mais, alors, pourquoi choisirait-il implicitement le référentiel de l'eau pour la distance parcourue, alors que la vitesse n'est pas définie dans un référentiel, même implicite ? Pourquoi, dans l'expérience rivière, l'étudiant choisirait-il implicitement le référentiel des berges

pour la distance parcourue, alors qu'il ne le fait pas pour la vitesse ? Pourquoi, dans l'exercice du tapis roulant, transforme-t-il les distances parcourues lorsque C fait un pas, et ne les transforme-t-il plus lorsque C, pour aller de J_1 à J_2 , en fait plusieurs ?

On pourrait penser que l'étudiant "oublie" que la question distance parcourue est demandée pour chacun des observateurs. A nouveau, on ne comprend pas pourquoi, dans le cas des deux exercices cités de l'enquête préliminaire, les étudiants répondent très souvent "vitesses différentes et distances parcourues identiques". "Oublieraient-ils" que la question porte sur le point de vue de deux observateurs en mouvement relatif, lorsqu'ils s'intéressent aux distances parcourues ; mais alors pourquoi ne l'oublient-ils pas pour la vitesse ? S'ils admettent une transformée pour la vitesse et s'ils appliquent la relation $v = d/t$, ils devraient fournir une réponse différente de celle qu'ils donnent. Or, nous avons constaté à l'enquête préliminaire (cf. Ch. I, p. 26) qu'ils n'utilisent quasiment jamais cette relation.

Il est donc vraisemblable que l'étudiant ne privilégie aucun référentiel. Si les étudiants se plaçaient dans un référentiel privilégié, il devrait y avoir transformation des distances parcourues : comme ce n'est pas le cas, on ne voit pas très bien ce que la notion de référentiel implicite signifierait. Si donc la distance parcourue n'est pas perçue comme distance séparant deux positions successives de l'objet, celles-ci étant définies par rapport à celui qui fait les mesures, que représente-t-elle et comment est-elle déterminée ? Nous allons essayer de trouver des éléments de réponses en étudiant le comportement des étudiants dans d'autres situations.

b) Les objets matérialisant les points de départ et d'arrivée ne sont plus immobiles l'un par rapport à l'autre : la distance qui les sépare, dans un référentiel - quel qu'il soit - dépend de la position de ces points et donc de l'instant où la mesure est faite.

En d'autres termes, il n'existe pas de référentiel où ces points sont au repos, contrairement au cas précédent.

Dans l'enquête préliminaire (exercice des lunettes et test de la vedette) et l'expérience caillou, le mouvement s'analyse comme le passage d'un point où le mobile est mis en route à un autre point où l'on arrête le moteur propre. Avec ces conditions, on a vu que les distances parcourues sont encore très souvent déclarées les mêmes pour les divers observateurs (cf. Ch. I et II).

Les justifications, pour la distance parcourue par une vedette (qui quitte un bateau pour en rejoindre un autre, cf. p. 35), sont du type : "c'est la même pour les deux observateurs car la vedette se déplace indépendamment des observateurs", pour les lunettes du type : "la hauteur de chute est la même pour les deux parachutistes car les lunettes sont indépendantes".

Mais on trouve aussi :

Lorsqu'une vedette quitte un bateau A pour rejoindre un bateau B en mouvement uniforme par rapport au premier, certains étudiants écrivent : "la vedette quitte un point fixe pour atteindre un autre point fixe". La distance parcourue est celle qui sépare les deux points fixes. Elle est bien sûr la même pour tous les observateurs qui s'accordent à dire que la vedette a quitté A pour rejoindre B : c'est AB qui a été parcouru.

A l'enquête préliminaire, les lunettes parcourent "la distance entre les deux parachutistes", sans plus de précision.

Dans l'expérience caillou, le caillou lancé de A à B parcourt la distance AB. Et l'on précise : "pour n'importe qui la distance entre deux points ne bouge pas", "la distance ne varie pas quelle que soit la position de l'observateur", "cela ne change pas qu'elle soit vue différemment par des personnes situées différemment".

Il est impossible de savoir dans quel repère implicite se place l'étudiant pour répondre. En effet, au test Q2 (B sur un bateau lance le caillou), lorsqu'il faut comparer les durées de parcours du caillou à l'aller et au retour, ceux qui font des schémas ont en général répondu "distances identiques" : on trouve alors des schémas où les distances sont apparemment représentées toutes deux dans le référentiel de A,

d'autres où la distance aller est, en fait, celle dans le référentiel de B et la distance retour dans le référentiel de A. Là encore, l'étudiant ne se place pas dans un référentiel - même implicite - pour répondre.

On note, dans ces dernières citations, les références aux positions, aux angles de vue des observateurs. Ceux-ci sont eux-mêmes figés dans le temps pour leurs observations de l'espace : le temps peut bien régler leurs mouvements relatifs, il disparaît dès qu'il s'agit de mesurer l'espace. De sorte que, une fois éliminées les seules différences qui pourraient apparaître (parallaxe, effets de perspective, etc.), leurs observations doivent être identiques.

Certains sont embarrassés car B est sur un bateau "qui se déplace". Aussi, on lit : la distance parcourue par le caillou, "c'est la distance qui sépare A de B lorsque B est arrêté". On fige à tout prix le point d'arrivée. Ou encore on n'arrive à aucune solution : "la distance entre A et B varie... mais je pense que la distance parcourue est la même pour A et B".

Il s'agit de savoir de quelle distance parle l'étudiant : les exercices (vedette, lunettes et caillou) ont un certain nombre de caractéristiques communes : la matérialisation des points de départ et d'arrivée auxquels correspondent un arrêt du moteur propre et l'objet, durant son trajet, se déplace indépendamment des observateurs. Ces éléments sont-ils tous déterminants ?

Dans le test vedette (cf. enquête préliminaire), nous proposons, en particulier, la phrase suivante :

"Quand la vedette a quitté le paquebot, celui-ci était à la hauteur du phare, quand la vedette a rejoint l'escorteur, celui-ci était au niveau de la balise rouge. La distance parcourue par la vedette, c'est la distance du phare à la balise : c'est la même pour les deux marins".

Les réponses sont claires : "la conclusion est correcte mais la distance parcourue par la vedette n'est pas la distance phare-balise". La matérialisation à l'aide d'un phare et d'une balise n'est pas un élément décisif.

Parallèlement, nous avons proposé une variante au test vedette déjà décrit : celle-ci ne quitte plus un paquebot pour rejoindre un escorteur, mais les observateurs relèvent ses positions à l'instant t_1 , puis à l'instant t_2 . Le pourcentage de réponses "distances identiques pour les deux observateurs" est du même ordre de grandeur que celui observé avec le test de la vedette ($\sim 70\%$). L'arrêt du moteur propre n'est pas, là encore, un élément déterminant.

C'est apparemment le mouvement de l'objet qui importe. Mais comment concilier ceci avec le fait que les observateurs sont déclarés être en mouvement ?

De façon générale, les commentaires fournis accompagnant les réponses sur les distances parcourues expliquent l'invariance de celles-ci par le fait "qu'elle ne change pas quelle que soit la position (et non le mouvement) des observateurs". Les positions de l'objet et des observateurs sont figées. Comment comprendre que ces positions soient figées alors que les observateurs sont bien considérés "en mouvement" ? Dans quel espace sont représentées ces positions ? Inutile de revenir sur le fait que les étudiants ne se placent pas dans un référentiel privilégié ou non, nous avons suffisamment insisté sur ce point.

Lors de l'étude de l'aspect explicatif du modèle, nous avons vu que le moteur propre créait un mouvement propre indépendant des observateurs ; pour que cette indépendance soit assurée, il faut pouvoir représenter ce mouvement dans un espace qui soit, lui aussi, indépendant des observateurs : la solution est de représenter tout mouvement propre dans un espace unique et non dans une infinité d'espaces correspondant chacun aux mètres et horloges de chaque observateur. Tout se passe comme si les étudiants "posaient" sur le papier les positions du mobile sans se préoccuper le moins du monde du référentiel, ni de l'instant où ces positions sont repérées. Nous dirons que cette distance, longueur séparant deux points "fixes", est une propriété géométrique du mouvement pour bien marquer cet effacement du temps. Ce caractère géométrique de la distance parcourue implique que l'espace dans lequel elle est représentée ne dépende pas des instants où les positions sont repérées - éventuellement de l'intervalle de temps entre les mesures - ; nous dirons alors que cet espace est intemporel. Ceci est une hypothèse que nous allons essayer de justifier.

L'expérience dépassement a été construite, en partie, pour

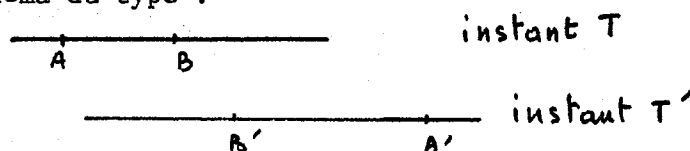
tester cette hypothèse : ses résultats (cf. Ch. II, partie II) la confirment largement. Limitons-nous, tout d'abord, aux tests "abstraits", les tests "concrets" faisant intervenir l'aspect explicatif du modèle.

Avec le test "mouvement-abstrait", chacun des huit compte-rendus est illustré par un schéma de ce type :



Le texte précise bien que les positions des mobiles a et b sont représentées par les points A et B à l'instant T, par les points A' et B' à l'instant T'. Si notre hypothèse est correcte, nous ne devrions pas voir les instants T et T' intervenir dans les réponses : c'est bien ce qui se passe, les étudiants se déterminant à partir d'un critère géométrique où le temps est exclu (cf. p. 58).

Avec le test "position-abstrait", chaque compte-rendu est illustré par un schéma du type :



Cette présentation focalise l'attention de l'étudiant sur les distances instantanées : si notre hypothèse est correcte, nous devrions observer un pourcentage élevé de bonnes réponses. Or, si 73 % des étudiants se déterminent explicitement à partir des distances AB et A'B' (c'est-à-dire les distances instantanées), un sur trois ne considère que le module de cette distance et aucun ne se réfère aux instants où les mesures sont réalisées. En revanche, un certain nombre justifie l'invariance de AB et A'B' par le fait que l'intervalle de temps T'-T est le même.

De façon générale, pour tous les tests de cette série, on s'aperçoit que les étudiants traitent de la même façon les distances instantanées et les distances parcourues, utilisant l'un ou l'autre

terme et justifiant l'invariance de l'une ou de l'autre à l'aide de la constance de l'intervalle de temps ($T'-T$).

Ce dernier résultat apporte encore de l'eau à notre moulin : si ces deux types de distances sont aussi peu différenciées, n'est-ce pas parce qu'elles sont représentées dans un espace unique et géométrique dont le temps serait évacué ; et celui-ci n'apparaîtrait que comme durée finie du passage d'un lieu à un autre.

Nous trouvons encore confirmation de cette hypothèse avec un test complémentaire que nous n'avons pas décrit dans le Chapitre II. Nous avons repris le test "position-concret" (car c'est celui qui a été le mieux réussi) en modifiant l'heure de pointage de deux compte-rendus, tout en maintenant constant l'intervalle de temps s'écoulant entre les pointages. Ainsi, les pointages effectués respectivement à 15 h et 18 h ont eu lieu, pour les compte-rendus 6 et 8 (sur les huit proposés) respectivement à 14 h et 17 h. Les résultats sont significatifs :

- 58 % des étudiants répondent à tous les compte-rendus sans se préoccuper de ce décalage horaire

- 17 % constatent que certaines heures ont été modifiées mais, comme le ΔT est le même, cela ne change rien : ils traitent donc tous les compte-rendus de la même façon

- 25 % enfin pensent qu'il est impossible de comparer les deux compte-rendus "piégés" aux autres à cause du décalage horaire. Cependant, parmi ceux-là, il y en a 20 % qui déclarent : "pour les compte-rendus 6 et 8 (compte-rendus avec décalage horaire), ce serait possible s'il n'y avait pas de changement de vitesse des deux bateaux entre 14 h et 15 h", ce qui signifie que, si les vitesses sont uniformes (d'après l'énoncé, elles le sont), le décalage horaire ne change rien. Tout se passe comme si on faisait une simple translation géométrique.

Ces résultats vont toujours dans le même sens : les étudiants traitent les positions comme des points fixes de l'espace unique de description, s'intéressent éventuellement à la durée entre deux positions successives, mais absolument pas aux instants où ces positions sont notées.

Tout ceci est très cohérent avec l'aspect explicatif du modèle : un objet qui se déplace a évidemment un moteur en fonctionnement ; il parcourt donc une distance qui dépend de la durée du parcours et non des instants de départ et d'arrivée. Cependant, cette distance, propriété intrinsèque de l'objet, peut, lorsqu'il y a entraînement, admettre une transformée par changement de repères qui est obtenue en combinant les effets des deux moteurs en jeu. Toutefois, cette combinaison a ses limites : dès que les points de départ et d'arrivée correspondent à des positions "fixes" dans l'espace unique de description (cf. exercice du tapis roulant avec J_1 et J_2), le caractère intrinsèque de la distance parcourue l'emporte. Il s'agit bien de positions "fixes" dans cet espace et non de matérialisation de ces points, puisque - lors des exercices de la vedette et du caillou - les mouvements des observateurs sont perçus et la distance qui les sépare est bien reconnue varier au cours du temps.

Nous pouvons donc caractériser cet aspect descriptif par :

B.1a) Il existe un espace unique, géométrique, dans lequel sont repérés les mouvements de tout objet : cet espace est intemporel

qui entraîne :

B.1b) Les points de départ et d'arrivée des mobiles sont des points fixes, indépendants du temps, et représentés dans cet espace unique.

B.1c) La distance parcourue par un mobile est unique : c'est une propriété géométrique du mouvement ; elle ne dépend pas de l'observateur.

B.1d) Longueurs, distances instantanées et distances parcourues sont les mêmes pour tous les observateurs.

B.1e) Le sens de déplacement d'un mobile est unique.

Nous avons déjà déduit B.1e du fait que le mouvement est une propriété de l'objet. L'existence d'un espace géométrique unique renforce cette affirmation : les points de départ et d'arrivée, une fois fixés, l'orientation en résulte. Il est en général impossible de séparer les deux origines.

Ainsi, dans l'exercice des lunettes (enquête préliminaire) certains étudiants disent : "les lunettes sont attirées par la terre", d'autres : "les lunettes tombent vers le bas".

De même, dans l'expérience dépassement, on a vu que le sens des déplacements est un critère fréquemment utilisé avec le test "mouvement-concret". Or, au test "position-concret" quelques étudiants, n'ayant pas adopté le critère distances instantanées, disent : "les bateaux doivent toujours se déplacer vers le sud" (comme pour le compte-rendu de référence). Ici les moteurs créent un sens de déplacement que l'on représente dans un espace géométrique. On retrouve ici le même phénomène qui fait dire à un cycliste qui en double un autre : "il va moins vite", et non "il recule".

L'unicité des distances parcourues, des sens des déplacements, n'est pas la seule conséquence de cet espace géométrique : la trajectoire elle-même s'inscrit dans cet espace : elle est donc unique et est une propriété du mouvement.

B.1f) Les mobiles ont une seule trajectoire.

Nous parlerons plus loin de la façon dont les étudiants construisent les trajectoires à partir des données géométriques et dynamiques. Mais une fois celle-ci construite, elle est comme figée et pourra être transférée, le cas échéant, d'un repère à l'autre sans modification. Ceci a été clairement mis en évidence par L. Viennot⁴ : un glaçon posé sur une table dans un avion qui effectue un virage a, pour un grand nombre d'étudiant, la même trajectoire dans

le référentiel de l'avion et dans celui du sol. Autre exemple que l'on étudiera plus loin lorsqu'un voyageur debout dans le couloir d'un train laisse tomber sa clé, elle tombe "verticalement". On verra qu'il est bien difficile de faire admettre que cette "verticale" n'est pas un invariant galiléen.

Qu'il y ait une trajectoire unique est renforcé par une dernière idée, fort importante pour la construction des trajectoires :

B.1g) Les objets sont orientés tangentiellement aux trajectoires.

On en a vu de nombreux exemples dans l'expérience rivière. Si on peut concevoir un objet qui se déplace "en crabe" - et encore, pas toujours, cf. expérience rivière -, il faut qu'un mécanisme d'entraînement concourt au mouvement. Hormis cette situation, il est clair que les mobiles vont droit : leur orientation fixe la direction de leur vitesse et donc de leur trajectoire.

2. Les points de vue de plusieurs observateurs : mouvements apparents et vrais

L'espace géométrique est peuplé d'observateurs qui peuvent être en mouvement les uns par rapport aux autres. Ils n'ont pas forcément la même vision des objets et de leurs mouvements, de sorte que plusieurs descriptions sont possibles. Comment concilier ceci avec l'unicité du mouvement, le fait qu'il est la propriété du seul mobile et non des observateurs ?

On trouve des éléments de réponses dans l'enquête préliminaire.

On lit, en effet, les règles générales suivantes : "quand deux objets se déplacent à vitesse différente mais constante, les objets qui les environnent leur apparaissent à des vitesses différentes", "un mouvement uniforme vu par plusieurs observateurs est apprécié de manière différente par chaque observateur", "l'observateur croît que...".

Les étudiants font donc une distinction entre mouvements vrais (réels) et apparents. Il faut noter que cette distinction n'est pas arbitraire : aucun étudiant n'appelle apparent un mouvement communiqué par le moteur propre, par le moteur d'entraînement ou encore par les deux en même temps. Un mouvement vrai correspond ainsi à une "réalité", liée à la présence de moteurs attachés à l'objet.

Que représente, dans ces conditions, le mouvement apparent ?
Nous trouvons des éléments de réponses dans toutes nos expériences.

A l'enquête préliminaire, les règles citées plus haut se réfèrent à une observation visuelle ("un mouvement vu"). Dans l'exercice des lunettes, il est très difficile de convaincre certains étudiants que les lunettes, en chute libre, n'ont pas la même vitesse pour les deux parachutistes. Seul l'appel aux souvenirs de films où l'on voit sur l'écran un objet - en chute libre - remonter, déclenche une réaction immédiate, suivie d'une correction rapide (s'accompagnant bien souvent d'une règle générale du type de celles que nous avons citées). C'est grâce à ce souvenir d'une observation visuelle, ne correspondant pas à ce qu'il pensait voir, que l'étudiant modifie sa réponse initiale : ce fut le seul contre-exemple qui eut une efficacité aussi rapide.

C'est encore, sans doute, l'observation visuelle qui est à l'origine des réponses correctes à la vitesse de l'affiche (exercice du tapis roulant). Cette situation où l'objet est "fixe" (pas de moteur ou moteur arrêté) est celle du paysage vu par n'importe quel voyageur. Il n'y a aucun problème, dans ce cas, pour qualifier d'apparent le mouvement de l'affiche, ni pour la doter d'une vitesse apparente.

Dans l'expérience dépassement (test "mouvement-concret"), nous avons noté que les étudiants acceptent que les modules des vitesses changent selon l'observateur, mais pas leur sens. La situation proposée ici est équivalente à celle d'une voiture rouge doublant, sur l'autoroute, une voiture bleue (c'est ainsi que deux étudiants du test MA ont, après réflexion, interprété l'énoncé ; cf. p. 58). Les différents observateurs voient, selon les vitesses propres en jeu, les voitures rouge et bleue aller plus ou moins vite mais toujours dans le même sens : personne n'arrive à croire que l'une recule et l'autre avance, par contre on envisage aisément que leurs vitesses (le module) paraissent différentes*. Là encore, si nous avons

* En d'autres termes, les étudiants acceptent éventuellement que la vitesse change de module mais pas de signe.

observé ce type de réponses - elles sont nombreuses - c'est sans doute parce que cette situation est familière. En revanche, lorsque la situation n'est plus familière, et par suite difficile à imaginer, on revient à l'unicité des vitesses.

C'est bien ce que nous avons observé avec les lunettes lorsque nous n'avons pas fait appel aux souvenirs de films de chute libre : il est alors très difficile de corriger les étudiants. Il faut noter que, excepté le contre-exemple du film, les seuls contre-exemples efficaces pour cet exercice (cf. p. 25) "immobilisent" tous l'un des observateurs (par exemple, accrocher l'un des parachutistes à un hélicoptère "faisant du sur-place"). Ceci revient à se mettre dans une situation quotidienne où l'on a déjà observé un mouvement apparent.

Cet ensemble de résultats indique que ce mouvement n'est pas obtenu à l'aide d'une composition cinématique, mais déduit d'une observation visuelle - qui revient, lorsqu'on ne vit pas la situation, à essayer d'imaginer ce que verrait un observateur. On est très loin d'une composition cinématique.

Cette interprétation permet de rendre compte, de façon cohérente, des résultats de l'enquête préliminaire et de l'expérience dépassement, mais semble être contradictoire avec ceux de l'expérience rivière. En effet, nous avons vu (appendice, expérience rivière) que la trajectoire du mobile dans le référentiel de l'eau était déclarée apparente, alors que celle-ci correspond à la trajectoire où seule la vitesse propre du mobile intervient. En reprenant les commentaires (cf. p. 74), on constate que, dans ce référentiel, "tout se passe comme s'il n'y avait pas de courant", et "chaque bateau semble se déplacer en ligne droite". L'étudiant supprime donc l'effet de l'un des moteurs. Cette suppression, ne correspondant à aucune réalité - le courant existe et le mobile le sent -, la trajectoire correspondante ne peut donc revêtir un caractère de réalité. Là encore, on est loin d'un raisonnement cinématique où on compose des mouvements, tous aussi réels les uns que les autres.

En revanche, lorsque l'eau est remplacée par un tapis roulant, on constate une différence au niveau des trajectoires : les trajectoires dans le référentiel du tapis ne sont plus apparentes ; cette

différence avec le cas de l'eau s'arrête là car les vitesses et les distances parcourues ne sont toujours pas définies dans un référentiel particulier, les étudiants continuant de parler de "la vitesse de", de "la distance parcourue par", sans donner plus de précision. Les justifications, à l'ordre d'arrivée, sont tout aussi erronées et incomplètes que dans le cas de l'eau : on trouve des trajectoires incurvées, des justifications dynamiques avec apparition de forces de frottement. La présence du tapis roulant permet de visualiser la trajectoire, le tapis symbolisant "la feuille de papier" correspondant à cet espace géométrique. Nous trouverons confirmation de cette affirmation un peu plus loin (partie III, § B.2) où nous verrons que cette visualisation n'est plus d'aucun secours dès que l'objet quitte le tapis.

En définitive, il n'y a pas véritablement composition des mouvements et des vitesses, au sens qu'elle a dans le modèle cinématique : "se mettre à la place de", pour tenter de décrire ce que l'on voit, "supprimer un effet" n'est pas la même chose que d'additionner deux vitesses, de composer deux mouvements.

Dernière remarque : les quantités apparentes n'interviennent jamais dans les calculs. Pour déterminer un temps de parcours, il faut combiner une vitesse réelle et une distance réellement parcourue. La vitesse réelle peut selon les cas être la vitesse propre ou la vitesse résultante. La combinaison de quantités apparentes ne peut pas mener à une durée dont personne ne doute, au moins au niveau des étudiants, qu'elle soit vraie ou unique*. On a déjà dit qu'apparent et réel coexistent, qu'un observateur peut à la fois voir un mouvement apparent et connaître le mouvement réel : en définitive, c'est toujours à ce dernier qu'on revient.

* Ce dernier point de vue devrait cependant être nuancé. En effet, jusqu'à un âge avancé, l'unicité du temps n'est pas du tout une évidence. Nous renvoyons le lecteur aux travaux de J. Crépault⁵ pour plus de détails sur ce point.

On peut résumer ce que nous venons de montrer de la façon suivante :

B.2a) Il existe deux types de mouvements : les mouvements vrais, réels et les mouvements apparents.

B.2b) Les mouvements vrais correspondent à ceux que les moteurs associés à l'objet lui communiquent. Les mouvements apparents* sont ceux qu'un observateur perçoit et qui sont incompatibles avec les moteurs connus.

Cette conception du mouvement apparent permet de concilier l'unicité du mouvement propre, le fait qu'il est la propriété du seul mobile et non des observateurs, avec l'existence d'un espace de description unique.

Ces définitions appellent un certain nombre de remarques : pour qualifier d'apparent le mouvement d'un objet, il faut que celui-ci soit incompatible avec celui qui est communiqué par le -ou les- moteurs associés à l'objet ; mais ceci implique de savoir si l'objet a ou non un moteur et de connaître son état de fonctionnement. Ce fut le cas dans toutes nos expériences. Cependant, si notre interprétation est correcte, dans le cas contraire, il n'y a pas de raisons particulières de le qualifier d'apparent .

En voici un exemple extrait d'un compte-rendu⁶ d'expérimentation d'un module d'astronomie en classe de 4ème, effectué par le Groupe de Travail de la Commission de Rénovation de l'Enseignement

* Les caractéristiques du mouvement apparent sont clairement définies dans le Petit Robert (1973), où l'on trouve :

"Apparent : qui n'est pas tel qu'il paraît être, qui n'est qu'une apparence. Le mouvement apparent du Soleil autour de la Terre (opposé à propre)".

"Propre : qui appartient d'une manière exclusive ou particulière à une personne, une chose, un groupe. Astron. : Mouvement propre d'un astre, d'une étoile, son déplacement angulaire indépendamment des mouvements de la Terre et de l'aberration astronomique".

de la Physique. Il s'agit de faire comprendre aux élèves le mouvement nocturne des étoiles vu de la terre. On lit :

"Ils (les enfants) voient bien la rotation d'est en ouest de toutes les étoiles. L'interprétation de la rotation est alors la terre tourne, les étoiles sont fixes ou la terre est fixe les étoiles tournent, et l'hypothèse des élèves : les deux tournent... parce qu'on sait que la terre tourne et qu'on a vu que les étoiles tournaient.

Les élèves se sont tenus à cette dernière hypothèse, juxtaposant des faits et ne les expliquant pas mutuellement. La compréhension du fait que tout mouvement doit être expliqué par rapport à certains objets, que le point de vue sur le mouvement n'est pas le même lorsque deux observateurs sont en mouvement relatif, est gênée dans ce cas par la fascination qu'exerce inconsciemment le repère terrestre".

En somme on voudrait qu'ils tiennent le mouvement des étoiles pour apparent. Or, ne pouvant constater l'immobilité des étoiles, il leur paraît plus simple de penser que le mouvement observé est vrai, ce qui n'est nullement contradictoire, en effet, avec la rotation de la Terre. On relèvera au passage l'explication de cette résistance donnée par les auteurs. Que la plupart des mouvements que nous observons soit repéré par rapport au sol ne fait aucun doute - le modèle naturel se construit bien évidemment là-dessus (la cinématique que pourrait construire un poisson vivant au milieu de l'Atlantique serait sans doute bien différente ; comment un tel poisson résoudre-t-il les problèmes d'évaluation de distances et des vitesses nécessaires à sa survie ?), mais pas uniquement : le rôle des moteurs est essentiel. Par exemple, un monde sans frottement, même repéré par rapport au sol, conduirait sans doute à une cinématique fort différente. Le modèle naturel est un ensemble complexe qu'il ne faut pas trop réduire.

C. UN EXEMPLE DE L'UTILISATION DU MODELE NATUREL : LA CONSTRUCTION DES TRAJECTOIRES

Le modèle naturel est d'un certain point de vue très cohérent, bien qu'il conduise à de nombreuses incohérences du point de vue de la cinématique et que l'étudiant ne semble pas toujours être lui-même cohérent à l'intérieur de ce modèle : en effet, il peut passer spontanément de l'aspect descriptif à l'aspect explicatif et réciproquement, sans que nous soyons capable de dire pourquoi. Il peut aussi utiliser certains acquis de la cinématique et revenir au modèle naturel (pratiquement 98 % des étudiants interrogés), sans que nous soyons, là encore, capables de dire pourquoi.

Le cas des trajectoires est exemplaire : la diversité des formes proposées par les étudiants, les contradictions et incohérences qu'elles révèlent paraissent a priori défier l'analyse. On peut cependant comprendre l'essentiel des caractéristiques de ces trajectoires comme conséquence du modèle naturel. Il va de soi que nous ne chercherons pas à expliquer le détail de chaque réponse de chaque étudiant : il faudrait, pour cela, savoir pourquoi, à tel moment, une solution va être choisie pour être abandonnée un peu plus tard au profit d'une autre, qui peut paraître très différente. Nous montrerons simplement comment les diverses solutions peuvent toutes se rattacher au même modèle.

1. Les éléments rencontrés dans le modèle naturel

La construction des trajectoires s'effectue à partir d'un certain nombre d'éléments déjà expliqués et que nous allons rappeler rapidement.

Parmi les éléments descriptifs, on a rencontré les points de départ et d'arrivée qui peuvent être matérialisés ou non par des objets immobiles l'un par rapport à l'autre ou en mouvement relatif. Pour les trajectoires, ces points sont soustraits du mouvement et fixés dans l'espace géométrique unique (voir B.1a). La forme des

trajectoires est également une propriété géométrique de l'objet en mouvement, les mobiles ont une seule trajectoire (B.1f) : une pierre tombe selon la verticale, un caillou lancé décrit une parabole...

D'autres éléments sont de type explicatifs : les mobiles ont des vitesses propres dues à leur moteur (A.2a) et éventuellement des vitesses d'entraînement (A.2d). Pour que cette dernière existe, il faut qu'un lien physique existe entre l'objet et le dispositif entraîneur (A.2e). Dans ce cas, il y a combinaison des effets des deux moteurs (A.4a).

Enfin certaines propriétés tiennent aux deux aspects : l'orientation des mobiles, par exemple, qui sont à la fois orientés selon leur vitesse propre et tangents aux trajectoires (B.1g) ou encore l'existence de deux sortes de mouvements, ceux qui sont réels et ceux qui sont apparents (B.2a), ces derniers étant liés à l'absence - ou la suppression par la pensée - d'un moteur propre ou d'entraînement (B.2b).

Dans l'ensemble des expériences décrites, on a distingué deux types de trajectoires, droites ou incurvées. On s'attachera uniquement ici à les relier au modèle naturel, quitte, ultérieurement, à voir ce qui pourrait également provenir d'une certaine connaissance du modèle cinématique.

2. Les trajectoires droites

Un certain nombre de situations conduisent facilement à des trajectoires rectilignes. L'exemple le plus élémentaire est celui où une seule vitesse propre intervient, dont la direction est alignée avec celle allant du point de départ à celui d'arrivée. C'est le cas dans l'expérience caillou, lorsque A lance un caillou à B et qu'on trace la trajectoire par rapport à A : les éléments utilisés sont le point de départ "fixe", A, et la vitesse de lancement, qui est ici la vitesse propre. Le point d'arrivée B

ne joue aucun rôle, il s'ajuste automatiquement puisque, par hypothèse, le mouvement de B est tel que B reçoive le caillou.

Un exemple moins trivial apparaît dans la même expérience, lorsqu'on demande la trajectoire, toujours par rapport à A, du caillou lancé maintenant par B. Une fois lancé, le caillou cesse d'être entraîné par le bateau de B ; il n'y a donc plus de vitesse d'entraînement, il ne reste plus que la vitesse due au lancement par B. De plus, ici, c'est le point d'arrivée qui compte, c'est lui qui est "fixe". Citons une justification : "pour que le caillou touche A, il faut que B lance le caillou lorsqu'il est juste en face de A". Le point de départ s'est donc ajusté pour être compatible avec la vitesse propre et le point d'arrivée.

Dans le cas où il y a entraînement permanent, la suppression - par la pensée - de cet entraînement amène à la même solution : la trajectoire est alors qualifiée d'apparente, car "tout se passe comme si l'effet de l'entraînement était supprimé", mais bien entendu il ne peut l'être réellement. On a rencontré ce cas en abondance à l'expérience rivière : la trajectoire des mobiles par rapport à l'eau est toujours droite, quelle que soit la réponse par rapport aux berges. On notera cependant que la même solution peut être qualifiée de réelle lorsque l'eau est remplacée par un tapis roulant : une distance parcourue se repère aisément sur le tapis et a une réalité que le tapis avance ou non.

La combinaison des vitesses propre et d'entraînement en une vitesse résultante unique permet aussi, dans de nombreux cas, d'aboutir à une trajectoire droite (voir expérience rivière). On a cependant signalé à leur propos un certain nombre de difficultés qui révèlent les limites de cette combinaison : l'orientation des mobiles fait généralement difficulté, la justification des durées utilise fréquemment la seule vitesse propre, ou bien des notions dynamiques (effort, etc.), ou encore le fait que le mobile pourrait ne pas atteindre l'autre rive à cause de l'effet du courant. Tout

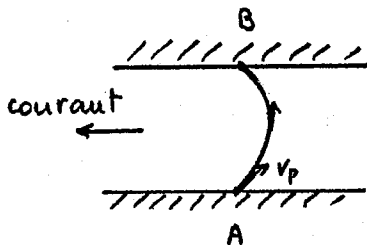
ceci montre que les considérations dynamiques ne sont pas plus absentes ici que dans le cas des trajectoires incurvées, même si c'est dans ce dernier cas qu'elles sont le plus explicitées.

3. Les trajectoires incurvées

Ce sont les plus nombreuses et elles ont presque toutes en commun une caractéristique essentielle : la vitesse propre est utilisée comme vitesse initiale. Le départ de la trajectoire est ainsi toujours tangent à cette vitesse propre, quel que soit le référentiel.

Voyons comment, à partir de là, sont construites les différentes trajectoires incurvées.

Celles-ci peuvent tout d'abord permettre de concilier points de départ, d'arrivée et direction de départ. C'est par exemple le cas à l'expérience rivière (Q4) où l'on se fixe les points de départ et d'arrivée et direction de la vitesse propre.

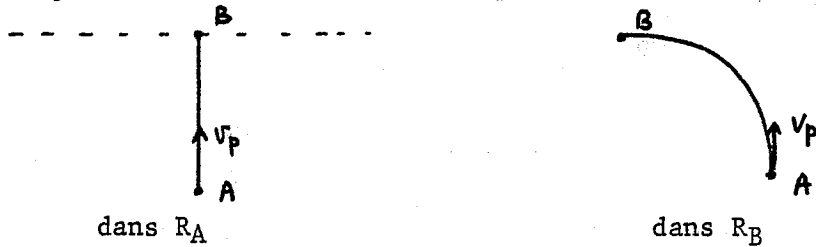


La trajectoire doit nécessairement revenir à A, après être partie suivant v_p . La courbure est due à l'effet du courant. Par exemple, on lit : "il y a la force du courant qui tire le nageur,

ce qui fait que la vitesse du nageur change de sens". Il y a explication dynamique de la courbure, effet progressif qui s'ajuste exactement pour amener au point d'arrivée prévu.

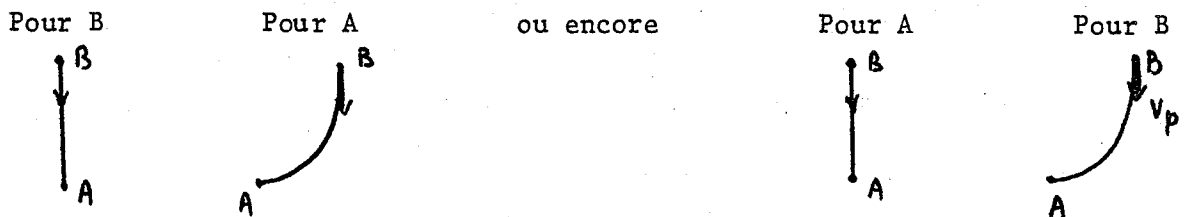
On trouve les mêmes éléments dans l'expérience caillou. A Q1, A lance le caillou à B. Quelle est la trajectoire par rapport à B ? Pour la tracer, il faut tenir compte du fait que B se déplace par rapport à A. Si la trajectoire est droite par rapport à A et que, par rapport à B, elle démarre de la même façon, elle ne peut être qu'incurvée par rapport à B. Le problème est de relier les points de départ et d'arrivée : la trajectoire du caillou va du point où se

trouve le lanceur, au moment du lancement au point où est celui qui reçoit, à l'instant de la réception.



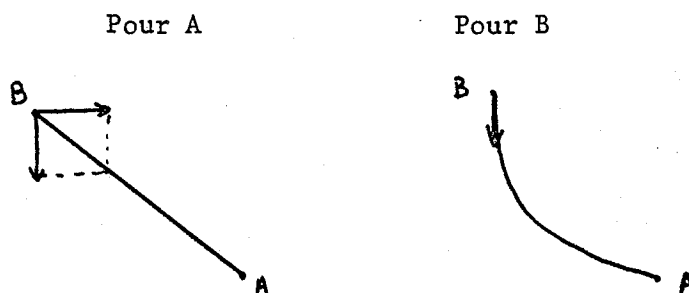
Il n'y a pas ici d'explication dynamique de la courbure par l'entraînement : c'est une justification purement géométrique. On a cependant noté dans les résultats que certains étudiants ne se satisfont pas de ce seul aspect géométrique, et introduisent la résistance de l'air ou le vent.

Les mêmes éléments se retrouvent lorsque B lance le caillou à A. On observe par exemple les types de schémas suivants :



Ces deux solutions ne se différencient que par le fait de savoir si c'est par rapport à B ou à A que le caillou va tout droit, la trajectoire pour l'autre est construite de la même façon.

On peut noter au passage une autre solution observée dans le même questionnaire. La forme est toujours fixée sur les points de départ, d'arrivée et la vitesse propre, mais c'est la vitesse qui se transforme lorsqu'on passe du point de vue de A à celui de B. Les points de départ et d'arrivée sont, eux, uniques.

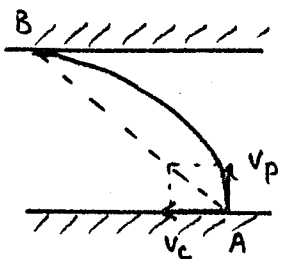


Revenons maintenant à l'entraînement. Son effet est conçu comme progressif et cumulatif, contrairement à celui du moteur propre qui donne, dès le départ, la vitesse propre. En un certain sens, l'entraînement ressemble fort à une force ; on a noté que, même dans le cas du tapis roulant, des forces sont invoquées pour justifier la courbure de la trajectoire : on met alors en jeu le frottement. A l'expérience rivière, on observe de nombreuses constructions du type suivant :



La vitesse d'entraînement est utilisée comme une variation de vitesse qui s'ajoute en permanence à la vitesse du mobile, la faisant tourner progressivement de façon à rendre compte de la trajectoire incurvée. Cette utilisation de la vitesse d'entraînement risque d'être une conséquence de l'absence de distinction claire entre force et vitesse : tout se passe comme si la vitesse propre était une vitesse initiale et la vitesse d'entraînement, une force constante s'exerçant sur l'objet. Cependant, cette construction apparaît principalement lorsque le point d'arrivée n'est pas déterminé ; dans le cas contraire, le point d'arrivée peut justifier à lui seul l'incurvation. Notons encore que certains schémas et commentaires indiquent que les deux effets interviennent simultanément. On notera l'ambiguïté de la vitesse à chaque instant : c'est selon les cas une vitesse résultante ou la vitesse propre du mobile qui a changé de direction - et éventuellement de module - sous l'effet du courant. Cette ambiguïté peut être avantageuse pour décider de l'orientation des mobiles : ceux-ci peuvent à la fois être dirigés selon la vitesse propre et tangents à la trajectoire.

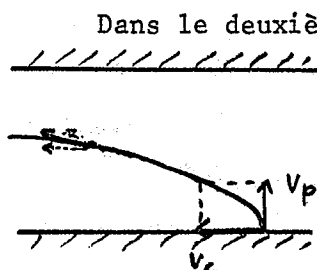
On rencontre d'autres constructions - il est vrai assez



marginales - dérivées des précédentes.

En voici deux exemples. Le premier utilise une composition des vitesses pour déterminer le point d'arrivée, puis revient à la trajectoire incurvée avec

départ selon la vitesse propre et effet progressif du courant amenant au point d'arrivée préalablement construit.



Dans le deuxième cas, il y a composition, dès le départ, des vitesses propre et d'entraînement ; mais l'effet cumulatif du courant agissant en plus, la trajectoire s'incurve de nouveau.

Il est clair qu'il s'agit de variations à partir des mêmes éléments. Insistons encore sur le fait que l'on peut observer chez le même étudiant plusieurs solutions en même temps (d'où la faible cohérence des réponses). De plus, il se superpose à ces éléments, empruntés au seul modèle naturel, des éléments appris en cinématique ou en dynamique : référence à des mouvements accélérés, utilisation de paraboles, etc., ainsi qu'on le verra bientôt. Pour l'instant, il s'agissait de montrer à la fois le large éventail des solutions possibles à partir du modèle naturel, et le petit nombre des idées qui les sous-tendent.

III. COMPARAISON DES MODELES NATUREL ET CINEMATIQUE

INTRODUCTION

Le modèle naturel diffère du modèle cinématique par son vocabulaire : vitesse propre et non relative ou "par rapport à"..., mouvements réels, apparents et non relatifs, etc. Cependant si, indépendamment de ces questions de langage, les deux modèles conduisaient aux mêmes conclusions, cela ne présenterait aucun intérêt de les distinguer. Il y a donc beaucoup plus que de simples différences de vocabulaire : il s'agit ici d'explicitier les divergences et les contradictions qui apparaissent entre les deux modèles, et de dégager un certain nombre de clés qui permettront à chacun de mieux s'y retrouver tout en illustrant les points qui sont à l'origine de ces divergences.

Par ailleurs, il ne faut pas trop sous-estimer le rôle du vocabulaire puisqu'il est en partie commun aux deux modèles. De ce fait, l'enseignement peut parfois renforcer le modèle naturel et non le remplacer par le modèle cinématique. Les deux modèles sont en permanence entremêlés et il n'est pas toujours facile de s'y retrouver. L'analyse de copies d'examen classique et de discussions, peu guidées, entre étudiants montrera comment les deux modèles interfèrent, dans des situations moins construites que les expériences rapportées plus haut. Ceci permettra de confirmer notre représentation du modèle naturel.

A. DIFFERENCES ET CONTRADICTIONS ENTRE LES DEUX MODELES

1. Résumé de certaines différences conceptuelles

Tout au long des chapitres précédents, nous avons détaillé les lois de transformation et les invariants utilisés dans le modèle naturel, dont certains sont incompatibles avec ceux du modèle cinématique. Le tableau suivant résume ces différences entre les deux modèles.

	Modèle cinématique	Modèle naturel
espace décrit	espaces multiples (référentiels) connectés spatialement et temporellement	espace unique géométrique et intemporel, peuplé d'observateurs
invariants	durées, longueurs, distances instantanées vitesse relative (vitesse de A par rapport à B)	durées, longueurs, distances instantanées et parcourues sens des déplacements vitesse propre
lois de composition	existence d'une seule loi géométrico-temporelle pour : - les vitesses instantanées - les distances parcourues - les sens de déplacement	existence de deux lois : - l'une <u>causale</u> (addition algébrique des effets de deux moteurs) qui définit des grandeurs résultantes - l'autre <u>géométrique</u> définissant des grandeurs apparentes

Il est inutile d'insister sur ces différences conceptuelles. Ce qui nous intéresse est d'en voir les conséquences dans les explications et les prévisions à propos de problèmes de cinématique.

2. Absence de référentiel dans le modèle naturel

Plutôt que d'une référence implicite à un référentiel privilégié, il convient de noter le refus de penser en termes de référentiels. A chaque fois que nous avons essayé d'analyser les réponses des étudiants en cherchant le référentiel implicite dans lequel ils se plaçaient, nous avons été obligés de nous rendre à l'évidence : les étudiants ne se posent jamais la question du référentiel. Nous en avons déjà vu des exemples avec la vitesse et la distance parcourue. Dans le premier cas, les étudiants raisonnent en terme de moteur et tout référentiel devient inutile ; dans le second cas, le référentiel s'impose d'autant moins que tout mouvement est décrit dans un espace unique et géométrisé. La nuance est importante car elle indique une forte résistance à penser en termes de référentiel. Ceci a un grand nombre de conséquences :

a) Il est possible de combiner des grandeurs physiques sans chercher à savoir dans quels référentiels elles sont définies. D'où des combinaisons dépourvues de sens dans le modèle cinématique.

Par exemple, lorsqu'il faut comparer les durées de parcours de deux mobiles et donc utiliser la relation $t = d/v$, les vitesses et les distances parcourues apparaissant dans cette relation sont définies dans des référentiels différents (expériences rivière et caillou). En revanche, lorsqu'on fournit un raisonnement s'appuyant sur cette relation, les étudiants contestent et refusent le résultat ainsi obtenu à chaque fois qu'il diffère de leur réponse spontanée (cf. le test de la vedette ; enquête préliminaire).

b) On traite les forces d'inertie sur le même plan que les forces d'interaction. L. Viennot⁴, dans sa thèse, a montré que ces forces sont indépendantes des référentiels et transférées d'un

référentiel à l'autre, tout comme les forces d'interaction.

c) Des problèmes différents deviennent identiques. Lorsque, dans l'expérience rivière, il faut savoir lequel des deux mobiles arrive le premier de l'autre côté de la rivière, le raisonnement utilisé est exactement le même que celui qu'on ferait dans le cas de deux cyclistes roulant à la même vitesse, dans des directions différentes, par un jour de grand vent.

Que ces problèmes paraissent toujours identiques marque bien la difficulté d'introduire la notion de référentiel : un moteur donne une vitesse, la cause suffit à justifier l'effet.

d) Des points de vue différents sont mêlés. On en verra un exemple au paragraphe B.2 avec le problème du cantonnier : les étudiants ne distinguent pas le point de vue du voyageur situé dans le train de celui du cantonnier qui se trouve à côté de la voie ferrée ; les conclusions qu'on en tire peuvent être surprenantes.

Bien entendu, dans un certain nombre de cas, les référentiels sont utilisés : cela se produit, en particulier, à chaque fois qu'il y a un entraînement physique et que le support du moteur est matérialisé. Nous avons vu apparaître les référentiels dans l'expérience rivière uniquement lorsque l'eau a été remplacée par un tapis roulant. Cependant on a noté que la présence du terme référentiel ne modifie pratiquement pas les réponses fournies aux trajectoires et durées de parcours, les étudiants revenant au système explicatif du modèle naturel.

De la même façon, les rares étudiants de l'enquête préliminaire qui avaient bien compris que la distance parcourue en un pas par C (sur le tapis roulant) et que la distance parcourue par ce même personnage pour aller de J_1 à J_2 (immobiles sur le tapis), étaient différentes pour les deux observateurs, n'ont pas réussi à admettre

que la distance parcourue par C entre le moment où il monte sur le tapis et celui où il en sort était différente dans les deux référentiels : c'est alors l'aspect descriptif du modèle naturel qui l'emporte.

Ainsi ces référentiels matérialisés sont très localisés dans l'espace et n'ont pas l'étendue de ceux de la cinématique. Nous verrons un peu plus loin que leur existence peut, parfois, être un handicap.

3. Mouvement propre - immobilité

Définir un mouvement à partir d'un moteur et non par rapport à un référentiel permet de penser que l'on peut toujours connaître l'état réel (propre) de mouvement d'un objet soit par "des mesures correctes", soit par "un calcul" (enquête préliminaire). Dans ces conditions, il devient très difficile d'immobiliser un objet en mouvement ou de faire bouger un objet immobile. C'est ce que reflète l'enquête préliminaire : nombreux sont ceux qui refusent de reconnaître que les lunettes tenues par un parachutiste sont immobiles par rapport à lui "puisque'elles bougent". Les étudiants ne comprennent pas ce qu'il y a de commun entre les exercices 2 (lunettes) et 3 (tapis roulant), puisque "dans l'exercice 2, aucun observateur n'est fixe, contrairement à l'exercice 3". Par ailleurs, un autre étudiant refuse d'admettre qu'un voyageur assis dans un train, non arrêté, est immobile dans le référentiel du train puisqu' "il bouge".

De même, dans l'expérience caillou, on trouve le commentaire suivant : "B se déplace par rapport au caillou et à lui-même".

Ces deux dernières citations montrent, au passage, qu'un déplacement n'est pas relatif, c'est-à-dire perçu comme déplacement "par rapport à". On retrouve ici le refus général de penser en termes de référentiel :

Qu'un objet matériel soit "immobile" ou "en mouvement" n'est donc pas du tout équivalent. D'où certaines incompréhensions qu'on rencontre dans les exercices de cinématique où il faut raisonner tantôt dans le référentiel d'un mobile et tantôt dans celui de l'autre. Tant qu'il s'agit de "mobiles" sans plus de précision, il n'y a guère de difficultés. Mais il en est tout autrement lorsque ces mobiles sont des objets physiques particuliers, comme dans l'exercice suivant : calculer l'heure la plus tardive à laquelle une vedette doit quitter un port pour rejoindre un bateau, se déplaçant parallèlement à la côte, à vitesse uniforme et devant passer à hauteur du port à une heure fixée. Si aucun étudiant n'accepte de gaieté de coeur de se placer dans le référentiel du bateau, c'est tout simplement parce qu'ils ne comprennent pas comment la côte peut acquérir, d'un seul coup, une vitesse réelle. De sorte que le conseil "placez-vous dans le référentiel du bateau" n'a généralement pas d'effet.

De façon générale, si l'on raisonne en terme de référentiel, il est facile d'inverser la proposition "A a une vitesse v par rapport à B". Mais dès que l'on raisonne en terme de moteur, la proposition devient, par exemple : "A a une vitesse v et B est immobile", et l'inversion devient impossible car elle suppose que physiquement on mette en marche B et que l'on arrête A. Contrairement à ce qu'on dit parfois, la réversibilité n'est pas une simple opération logique.

4. Distances parcourues

Les divergences les plus faciles à mettre en évidence entre les deux modèles concernent sans aucun doute les distances parcourues : celles-ci, étant des propriétés géométriques du mouvement, sont uniques et ne dépendent pas de l'observateur. Elles sont évaluées à partir des points de départ et d'arrivée, points figés dans un espace géométrique et intemporel, la coordonnée temps ne jouant plus aucun rôle. Ces distances ont donc les mêmes propriétés que les longueurs ou distances instantanées.

Nous avons cité suffisamment d'exemples, tant dans le vocabulaire employé que dans les raisonnements (cf. expérience dépassement) pour qu'il soit inutile d'insister.

Cette géométrisation de la distance parcourue est si puissante que l'on arrive rapidement à provoquer des situations de conflit. Par exemple dans l'expérience caillou, après la fin du test, un étudiant n'arrivait pas à comprendre pourquoi les distances parcourues par le caillou sont différentes dans les deux référentiels. Reconnaisant que les vitesses sont différentes et que la relation $v = d/t$ est valable dans chaque référentiel, il s'est ainsi trouvé devant deux réponses contradictoires et ne savait plus laquelle était correcte.

Il est significatif de noter que beaucoup d'enseignants réagissent de la même façon lorsqu'on leur demande si "la hauteur de chute des billes que Toto laisse tomber du sixième étage est la même dans le référentiel du sol et dans celui de l'ascenseur dans lequel se trouve son père". Contrairement aux étudiants, ils arrivent eux-mêmes très rapidement à une contradiction car ils pensent à utiliser la relation $v = d/t$. Mais on en rencontre qui, bien que reconnaissant la validité de la réponse formelle, ont beaucoup de mal à se convaincre que la distance parcourue est autre chose que la hauteur de l'immeuble.

5. Les trajectoires

Lorsqu'elles sont déduites du modèle naturel, les trajectoires présentent un certain nombre de caractéristiques qui contredisent le modèle cinématique : s'inscrivant dans un espace géométrique, elles sont une propriété du mouvement et ne se transforment donc pas facilement, ou même pas du tout - lorsqu'on passe d'un référentiel à l'autre, elles sont transportées en bloc et non pas reconstruites à chaque fois (voir à ce propos le test "glaçon" décrit par L. Viennot⁴).

Leur forme n'est pas quelconque : en particulier le départ des trajectoires est très souvent tangent à la vitesse propre. Sans reprendre les exemples examinés à l'expérience rivière, voici une situation où l'on a pu observer les mêmes comportements.

Lors d'un questionnaire^{*}, on demandait de représenter sur un plan comportant un manège et son entourage (des arbres, donc implicitement du point de vue du sol), la trajectoire d'un noyau de cerise lancé tangentiellement par Pif, juché sur un cheval situé au bord du manège. La vitesse était indiquée sur la figure mais il avait été involontairement omis de préciser dans quel référentiel elle était représentée. A part le fait que tous les étudiants ont interprété cette vitesse comme étant celle communiquée par Pif, c'est-à-dire la vitesse propre, deux étudiants sur trois ont tracé une seule trajectoire (celle vue par Pif), en général, incurvée et telle qu'elle soit tangente au départ à la vitesse propre initiale.

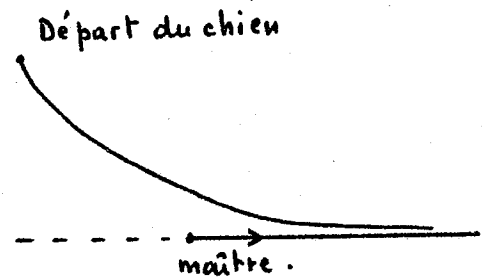
Selon qu'il s'agit simplement de "mobiles", principalement ponctuels, ou d'objets physiques ayant des formes particulières, on a vu que la nature des réponses est modifiée : dans le deuxième cas, les objets sont supposés être orientés tangentiellement à leur trajectoire, ce qui peut modifier complètement celle-ci.

Considérons le problème suivant : un chien est appelé par son maître, lequel marche d'un mouvement rectiligne et uniforme sur une droite qui ne passe pas par la position de départ du chien. Le chien court en visant constamment son maître, sa vitesse par rapport au sol ayant un module constant ; dans le référentiel du sol, il décrit une courbe appelée courbe du chien.

^{*} Ce questionnaire a été posé à des étudiants de première année d'université. Il fait partie des enquêtes préliminaires entreprises par L. Viennot et n'a touché qu'un faible nombre d'étudiants.

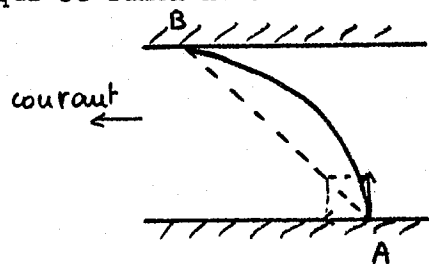
Qu'en est-il dans le référentiel du maître ? Il est facile d'obtenir comme réponse "une droite" sur la base de l'argument simple suivant :

le chien vise toujours son maître qui est immobile dans ce référentiel. Il est probable qu'en remplaçant le chien et son maître par des mobiles ponctuels, ce type de réponse soit beaucoup moins évidente.



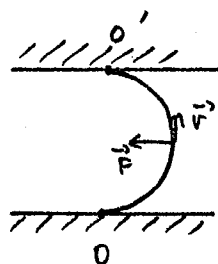
Enfin la construction des trajectoires est un lieu idéal d'interférences entre le modèle naturel et ce que l'étudiant a appris en cinématique et en dynamique.

C'est ainsi qu'il faut probablement comprendre certaines constructions - a priori bien étranges - observées dans l'expérience rivière, qui se ramènent au schéma suivant :



Le point d'arrivée est déterminé par une composition de vitesses de type cinématique, puis on revient au modèle naturel pour joindre le point de départ au point d'arrivée ainsi construit.

Les trajectoires incurvées donnent lieu à de nombreuses justifications dynamiques. La vitesse propre tient le rôle de vitesse initiale, la vitesse d'entraînement devient une force, le mouvement est uniformément accéléré, la trajectoire est une parabole. On voit parfois utiliser explicitement $\vec{F} = m \vec{\gamma}$, $x = 1/2 g t^2$, ou encore des justifications comme celle-ci :



"il y a la force du courant qui tire le nageur, ce qui fait que la vitesse du nageur change de sens, mais pas de module. En continuant ainsi

jusqu'au point O', on s'est aperçu que le nageur suit une trajectoire circulaire".

On pourrait penser que le courant induit ce comportement ("le courant est fort"...), mais cette nécessité de justifier une courbure par des forces s'observe aussi dans le problème du tapis roulant où l'on invoque alors les forces de frottement entre le tapis roulant et la voiture. On a noté certaines justifications de ce type à l'expérience caillou : c'est dire que la trajectoire courbe est très probablement déterminée a priori et la force n'est là que pour recoller les connaissances de dynamique déjà acquises et l'idée qu'on s'est faite de la trajectoire.

Citons pour terminer, cet étudiant qui, toujours à l'expérience rivière, a tout construit selon le modèle cinématique - ses trajectoires sont rectilignes - et finit par dire que le mobile pourrait bien ne pas atteindre l'autre rive "si le courant est trop fort".

S'il fallait conclure, on rappellerait simplement que "la ligne droite n'est pas le mouvement le plus naturel" (Koyré⁷, p. 206) et qu'elle résulte généralement de constructions qui, bien que simples, ne sont pas forcément comprises comme reflétant la réalité.

6. Le moteur, propriété de l'objet

Dans le modèle naturel, un mobile est généralement mû par un moteur propre, fonctionnant de façon parfaitement autonome : que ce moteur soit en marche ou à l'arrêt ne dépend nullement de son environnement. L'autonomie du moteur renforce l'idée que la vitesse est une "propriété" de l'objet : il n'y a pas plus de nécessité matérielle que théorique de comprendre une vitesse comme "vitesse par rapport à". En d'autres termes, le fait que le moteur ait - au moins dans un grand nombre de cas - besoin d'un support pour fonctionner (sol, air, eau, etc.) n'est pas du tout évident. De ceci découlent de nombreuses difficultés de compréhension. Par exemple, selon qu'on considèrera la vitesse propre d'un avion comme celle

par rapport à l'air ou au sol, on n'arrivera pas aux mêmes résultats - et on a vu combien il est facile de sauter inconsciemment d'un point de vue à l'autre.

On trouve confirmation des idées précédentes dans le fait suivant. Lorsqu'on demande "qu'est-ce qui fournit la quantité de mouvement à une voiture qui se met en route ?", la réponse la plus évidente et la plus souvent obtenue est "son moteur". Réponse bien facile à justifier : le moteur est la cause du mouvement et donc fournit tout à la fois vitesse, quantité de mouvement et énergie cinétique. Argument que certains explicitent dans un langage plus formel : le moteur crée \vec{v} , donc $1/2 mv^2$ aussi bien que $m\vec{v}$. Faire comprendre que ce raisonnement, en apparence impeccable, est erroné, est souvent fort difficile. Il a de plus l'avantage d'économiser l'analyse des interactions entre le moteur et son support, dont on sait combien elle peut être parfois délicate et toujours difficile pour les étudiants.

D'une façon générale, la notion d'interaction est obscurcie ou éliminée par cette conception de moteur-propriété. Ceci n'est pas vrai seulement pour les mobiles habituels : on a vu par exemple, à l'enquête préliminaire, que le poids faisait office de moteur dans le cas de la chute libre (voir l'exercice des lunettes). Le langage est de ce point de vue très révélateur : on dit le poids de l'objet, aussi bien que la masse (et ces termes sont bien souvent utilisés comme synonymes). Nous renvoyons pour plus de détails sur cette attribution du poids à l'objet et ce qui en découle, en particulier à propos de l'énergie potentielle, aux travaux de L. Viennot³.

B. DEUX EXEMPLES

B.1. ANALYSE DES COMPORTEMENTS D'ETUDIANTS EN SITUATION SCOLAIRE TRADITIONNELLE

Introduction

C'est à partir d'expériences et de tests, conçus comme outils de recherche, que nous avons réussi à dégager un certain nombre de caractéristiques du raisonnement étudiant. Mais nous sommes, jusqu'ici, restés dans le cadre très restreint de nos expériences. Peut-on dire alors que les comportements seraient les mêmes en situation scolaire traditionnelle ? C'est pour répondre à cette question que nous avons repris des copies, déjà corrigées, d'un examen de physique.

Cet examen, construit dans le but d'évaluer le "niveau" de l'étudiant et non de détecter des procédures de raisonnement, fait donc appel à des méthodes habituelles de résolution de problèmes (calcul, etc.). Par ailleurs, les réponses fournies portent la marque de cette situation de contrôle : certains cherchent à gagner des points en donnant des réponses incomplètes à chaque question, d'autres écrivent un roman-fleuve en espérant que le correcteur en tiendra compte, d'autres, enfin, très économes, essaient d'en écrire le moins possible. Cet ensemble de copies n'est donc pas un outil facilement analysable. Cependant le dépouillement s'est trouvé facilité par le fait que, d'une part, nous savions quoi y chercher et que, d'autre part, le problème posé était le même que celui des tests de l'expérience 'rivière, bien que la présentation en fût différente.

Grâce à la collaboration de l'équipe d'enseignants* de l'une

* qu'il nous soit permis de remercier ici toute l'équipe d'enseignants de cette section.

des sections de première année de DEUG^{*}, nous avons eu la possibilité d'accéder aux copies de l'examen partiel de 1975. Pour des raisons techniques, les étudiants ont été répartis en deux groupes, chacun d'eux ayant un sujet différent. Chaque sujet comporte plusieurs exercices, dont un sur les changements de référentiels. L'exercice de cinématique est, pour les deux groupes, celui du nageur devant traverser une rivière. Tout en gardant le même schéma directeur, la présentation, le nombre de questions, l'ordre dans lequel elles sont posées varient d'un sujet à l'autre.

1. Enoncés des exercices

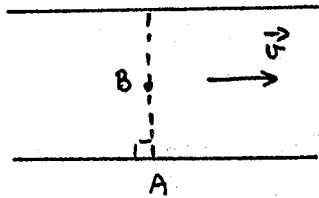
Enoncé A

Un nageur doit traverser une rivière en partant d'un point A situé sur la rive. Sachant qu'il a une vitesse constante par rapport à l'eau, de module u , que la rivière a une largeur d et que le courant a une vitesse v :

- 1) Tracer les différents vecteurs vitesse que l'on peut envisager dans ce problème.
- 2) Calculer le temps mis par le nageur pour atteindre l'autre rive
 - a) par le chemin le plus court en distance dans le repère du rivage
 - b) par le chemin le plus rapide
 (Etudier les cas $u < v$ et $u > v$).
- 2) Le nageur veut atteindre une barque qui dérive au milieu de la rivière. La barque se trouve en B (sur la perpendiculaire à la rive en A) au moment où le nageur quitte le point A. Quelle direc-

* A Paris VII, l'enseignement est divisé en unités de valeur, chacune d'entre elles durant un semestre. L'enseignement de la cinématique et de la mécanique a lieu durant le premier semestre de la première année du D.E.U.G.-S.S.M. et constitue le programme des unités de valeur QA110-111.

tion doit prendre le nageur pour atteindre la barque ? Au bout de combien de temps l'atteindra-t-il ?



Enoncé B

Un nageur plonge en A avec l'intention de traverser une rivière de largeur d dont on supposera les eaux animées d'un courant de vitesse uniforme V .

- 1) Le nageur se propulse par rapport à l'eau à la vitesse v uniforme perpendiculaire au courant. Quels sont sa trajectoire relativement aux rives, son point d'abordage, le temps de sa traversée ?
- 2) Le nageur désire en fait aborder au point B situé en regard du point A. Que doit-il faire pour parcourir une trajectoire AB rectiligne en nageant avec une vitesse de module constant v par rapport à l'eau ? Quel est le temps de la traversée ? Est-ce toujours possible ?
- 3) Le nageur nage à la vitesse constante v en s'orientant instinctivement vers le point B. Dessiner approximativement la trajectoire dans le cas où $v \gg V$ et dans le cas où $v < V$.

2. Résultats et discussion

a) Résultats d'ensemble

Sujet A

Ce sujet a été posé à 84 étudiants, 71 abordent le problème. 68 étudiants répondent à la première question. Tous, sans exception, tracent la vitesse du courant (\vec{v}) sans préciser, tout comme les auteurs de l'énoncé, le référentiel dans lequel elle est définie.

Tous tracent également la vitesse \vec{u} du nageur mais seulement 28 % tentent de préciser le référentiel. Bien que 83 % des étudiants tracent la vitesse $\vec{w} = \vec{u} + \vec{v}$, aucun n'arrive ou n'essaie de la définir dans un référentiel.

65 étudiants abordent la deuxième question : 4 donnent une réponse correcte bien qu'aucun d'entre eux n'ait démontré pourquoi le chemin choisi par eux était le plus rapide. Pour les durées de parcours, 59 % des étudiants utilisent à 2a ou à 2b des grandeurs définies dans des référentiels différents. Cependant, utiliser des grandeurs définies dans le même référentiel pour calculer la durée de la traversée ne conduit pas forcément à la bonne réponse. En effet, certains (12) écrivent que $\vec{u} + \vec{v} = u + v$, d'autres que $w^2 = u^2 + v^2$, ou encore $w^2 = u^2 + v^2 + 2v$. On retrouve ici la difficulté bien connue de déterminer le module d'un vecteur, somme de deux autres.

Enfin 46 étudiants abordent la dernière question : cinq donnent une réponse correcte et argumentée. Tous les autres ne vont pas jusqu'au bout ou font apparaître dans leurs formules des grandeurs définies dans des référentiels différents.

Sujet B

Ce sujet a été posé à 51 étudiants : 46 abordent l'exercice et aucun ne le traite complètement.

43 étudiants cherchent le point d'abordage : tous, sauf un, donnent une réponse correcte.

Des trajectoires sont demandées aux questions 1 et 3. 53 % des étudiants tracent une ou deux trajectoires selon qu'ils répondent aux deux questions ou à une seule. Sur l'ensemble, on trouve 71 % de trajectoires incurvées et 29 % de trajectoires droites (celles-ci se rencontrant principalement à la première question).

30 étudiants calculent les durées des traversées. Là encore, le nombre d'étudiants qui, à un moment donné, combinent des grandeurs définies dans des référentiels différents est élevé (entre 50 % et 60 % selon la question).

Enfin, la dernière question est abordée par deux étudiants qui n'arrivent pas à y répondre.

b) Association moteur-vitesse

Les seules vitesses envisagées (dans le sujet A) sont, au maximum, au nombre de trois : les vitesses propres du nageur et du courant et la vitesse résultante. Aucun étudiant n'a envisagé la vitesse de l'eau par rapport à l'eau, la vitesse des rives par rapport à l'eau, etc. Ceci n'est guère surprenant ; mais il n'est pas indifférent que seules les "vraies" vitesses, c'est-à-dire les vitesses associées aux moteurs, apparaissent dans les réponses.

Par ailleurs, ces vitesses ne sont qu'exceptionnellement rattachées à un référentiel. Si certains (20 %) précisent bien le référentiel dans lequel est défini \vec{u} , aucun n'en fait autant pour \vec{w} . En effet, on lit :

" \vec{w} est la vitesse du nageur".

" \vec{w} est la vitesse que le nageur aurait s'il n'y avait pas de courant".

" \vec{w} est la vitesse réelle du nageur, la vitesse absolue du nageur".

" \vec{w} est la vitesse effective du nageur en fonction de \vec{u} et \vec{v} , \vec{u} étant la vitesse absolue".

" \vec{w} est la vitesse du nageur dans le repère des berges dans le sens du courant ; contre le courant, la vitesse du nageur dans ce même repère est \vec{u} ".

On rencontre aussi trois lapsus révélateurs : \vec{u} et \vec{w} sont toutes deux appelées vitesse du nageur par rapport à l'eau.

Cette prise en compte des seules vitesses "réelles" et

l'absence de référentiel se retrouvent donc dans ces copies ; nous allons voir que ce n'est pas sans influence sur la résolution du problème et donc sur la compréhension de la physique sous-jacente.

En effet, le nombre d'étudiants qui, lorsqu'il faut calculer la durée d'une traversée, combinent une vitesse et une distance parcourue définies dans des référentiels différents est élevé. En général, mais pas toujours, les étudiants utilisent la distance que parcourt le nageur dans le référentiel des berges et la vitesse propre du nageur et non la vitesse résultante définie antérieurement (au moins pour le sujet A). Cette vitesse résultante tient compte des effets des deux moteurs en jeu et n'illustre pas les seuls efforts physiques du nageur : c'est peut-être la raison pour laquelle on revient presque toujours à la vitesse propre.

Cette compréhension de la vitesse se retrouve lorsqu'il faut savoir (sujet B) si le nageur peut toujours arriver en face de son point de départ. Aucun étudiant n'utilise la valeur de la vitesse résultante, même s'il l'a calculé auparavant. Le trajet n'est possible que si :

"la vitesse (propre) du nageur est très grande devant celle du courant"

" $v_{\text{courant}} \ll v_{\text{nageur}}$ "

"si le courant est trop fort, le nageur ne pourra jamais atteindre l'autre rive".

De même, lorsqu'à la deuxième question du sujet A, il faut étudier le cas $u < v$, un étudiant écrit :

"le cas $u < v$ n'existe pas car le nageur entraîné par le courant a toujours une vitesse $u > v$ ".

Ce n'est pas à partir de la vitesse résultante ($w = \sqrt{u^2 - v^2}$) et donc de l'étude d'une relation qu'ils raisonnent, mais directement en comparant les deux vitesses propres du problème.

On retrouve également un phénomène déjà connu : la vitesse propre est souvent assimilée à une force :

"(ce chemin n'est) pas le plus rapide car il faut contrer la force du courant" (sujet A)

"on appelle θ l'angle formé par les résultantes des forces" (sujet A)

"en tout point de la trajectoire du nageur, il s'applique deux forces perpendiculaires : \vec{F} due au courant et \vec{F}' la force de propulsion du nageur" (sujet B).

Cette vitesse peut encore être liée à une énergie. En effet, lorsqu'il faut trouver (sujet A) le chemin le plus rapide, on écrit :

"chemin le plus rapide : le nageur part perpendiculairement aux rives : c'est là qu'il perd le moins d'énergie"

"ce chemin est le plus rapide parce que le nageur ne lutte pas contre le courant", etc.

c) Les trajectoires

Le nombre de trajectoires incurvées est impressionnant et très peu d'étudiants ont tracé des trajectoires droites, contrairement à nos tests. En revanche, nous trouvons les mêmes justifications dynamiques :

"le nageur lutte contre le courant"

"le nageur est dévié, emporté par le courant"

"on ne peut garder une trajectoire rectiligne sur une rivière lorsqu'il y a un courant à moins que $v_c \ll v_{\text{nageur}}$ "

"dans R_E (référentiel de l'eau), la trajectoire est une droite, dans R_T c'est une parabole car le nageur est emporté".

De même, à la dernière question du sujet A, où pourtant on ne demande pas de tracer de trajectoire, on trouve le commentaire suivant :

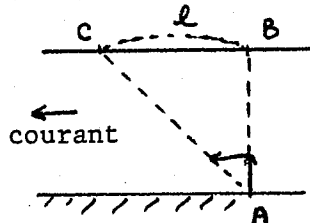
"le nageur prendra la direction qui aura la forme d'une parabole car quand il quittera la rive, la barque continuera à descendre la rivière".

On retrouve ici des traces de l'enseignement : la vitesse propre du nageur étant traitée comme une vitesse initiale et la vitesse du courant comme une force constante s'exerçant sur le nageur, la

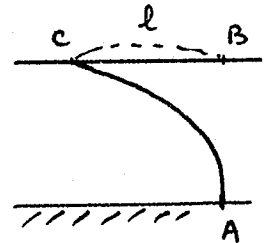
trajectoire a la même forme que celle obtenue lors d'un problème de chute libre, avec vitesse initiale horizontale.

d) Relations entre distances parcourues et trajectoires

A la lecture de ces copies, on peut difficilement penser qu'une distance parcourue est déduite de la trajectoire correspondante. En effet, dans le sujet B, la distance parcourue correspond toujours à la longueur d'un segment de droite alors que la trajectoire correspondante est souvent incurvée. On trouve ainsi ce commentaire qui vaut deux points d'interrogation de la part du correcteur :



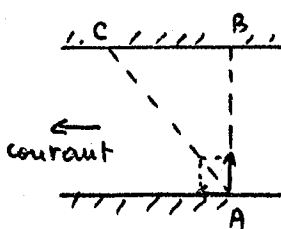
son point d'abordage
sera à l de B et sa
trajectoire est :



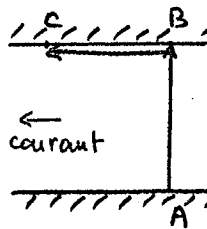
Réciproquement, déterminer le point d'abordage et la distance parcourue ne suffit pas pour tracer la trajectoire correspondante. En effet, sur les 42 étudiants qui trouvent le point d'abordage, 84 % calculent la durée de la traversée et 20 % seulement tracent une trajectoire à la première question.

La distance parcourue ne semble pas représenter, en tout cas dans ce problème, la longueur de la trajectoire.

Ce phénomène découle directement du modèle naturel : dans l'exercice B, on demande de déterminer le point d'abordage ; celui-ci est obtenu dynamiquement en additionnant les effets des deux moteurs en présence. En effet, on trouve deux types de schémas :



et



"s'il n'y avait pas de courant, il arriverait en B, le courant le déporte de BC, il arrive donc en C".

A partir du point d'arrivée ainsi construit, les étudiants en déduisent la distance parcourue, propriété géométrique du mouvement, en considérant la longueur du segment de droite qui relie le point de départ au point d'arrivée - inutile de préciser le référentiel puisqu'il s'agit de LA distance.

En revanche, la trajectoire doit concilier l'effet progressif du courant avec la position du point d'arrivée préalablement déterminé : elle ne peut donc pas être une droite (cf. partie III, § C).

e) Un exercice traditionnel comme outil de contrôle

Nous voudrions soulever ici un problème bien connu mais souvent oublié dans les faits : un exercice classique et calculatoire n'est pas toujours un exercice de compréhension, certains étudiants pouvant donner "une bonne réponse" sans pour autant avoir compris la physique sous-jacente. Le sujet A illustre fort bien ce point de vue. Citons en effet des réponses, jugées correctes :

Un étudiant explique correctement comment il détermine la durée de la traversée à 2a. Pour 2b, il écrit :

"le nageur part perpendiculairement à la rive, donc $t = d/u$ ".

Un autre écrit à 2b :

"la vitesse du nageur doit être parallèle à AB (quelle vitesse ?) et en déduit que $t = d/u$ ".

Bien que ces réponses soient formellement correctes, elles sont à rapprocher de celles-ci :

" $t = d/v_a = d/u$ (v_a est, d'après la première question, la vitesse $\vec{w} = \vec{u} + \vec{v}$)"

" $t = \frac{d}{u+v}$ si $u < v$ le chemin est le plus rapide
si $u > v$ le chemin est le plus court $\Rightarrow t = \frac{d}{u}$."

Ces dernières ont été, contrairement aux deux premières, jugées fausses. Or tout laisse penser que cette formule ($t = d/u$) a été obtenue à chaque fois de la même façon et non, comme on pourrait le penser, à partir d'un raisonnement qui consisterait à se placer dans le référentiel de l'eau.

Il ne s'agit pas de jeter la pierre aux correcteurs qui n'avaient aucune raison de suspecter la signification de réponses de ce type, mais de rappeler qu'un exercice calculatoire n'est pas un bon outil permettant de contrôler la compréhension d'un phénomène physique et donc la physique correspondante.

3. Conclusion

Le modèle naturel décrit au chapitre précédent rend facilement compte des réponses observées. Cette étude, tout en confirmant la validité de ce modèle, révèle aussi à quel point il est solide et résistant.

Si la physique actuellement enseignée n'est pas comprise par les étudiants, il est clair que les réactions des étudiants laissent perplexes bon nombre d'enseignants (il suffit pour s'en convaincre de relever les nombreux points d'interrogation des correcteurs). Ceci justifie le type de travail entrepris ici : il permet de comprendre les difficultés rencontrées et peut en retour permettre aux enseignants de construire un enseignement mieux adapté et qui éviterait un grand nombre de "dialogues de sourds".

B.2. ANALYSE DE DISCUSSIONS SUSCITEES PAR LA PROJECTION D'UN FILM SUR LES CHANGEMENTS DE REFERENTIELS

R. Rossi et son équipe du service audio-visuel de l'Ecole Normale de Saint-Cloud ont tourné en 1976, avec la collaboration de J.P. Maury et J.L. Malgrange, un film intitulé "Introduction aux changements de repères galiléens". Ce film est composé de deux parties :

- La première, en couleur, montre un évènement simple (deux personnages jouent au ballon sur un tapis roulant) filmé simultanément par deux caméras, l'une fixe et l'autre mobile, c'est-à-dire située sur le tapis roulant. Les deux prises de vue ainsi obtenues sont projetées simultanément sur les parties haute et basse de l'écran. Les trajectoires sont ensuite visualisées à l'aide de points blancs fixés sur la pellicule. Les auteurs du film montrent ensuite comment il a été tourné : les personnages sont immobiles sur le quai d'une gare et c'est le décor qui bouge. Pour finir, on voit un seul personnage lancer le ballon en l'air et le rattraper.

- La deuxième, en noir et blanc, montre des discussions entre étudiants, discussions suscitées par le film en couleur.

C'est cette deuxième partie que nous allons analyser maintenant. L'intérêt d'une telle analyse est double : elle peut permettre non seulement de valider le modèle naturel explicité plus haut - les réponses fournies s'expliquant aisément à l'aide de ce modèle - mais aussi de comprendre où et comment les deux aspects de ce modèle interviennent, aspects qui, rappelons-le, sont étroitement entremêlés.

1. Déroulement de la discussion

Au départ, un animateur aide au démarrage de la discussion ; puis dès que celle-ci est amorcée, il intervient le moins souvent possible : éventuellement il demande à chacun d'expliciter son point de vue tout en évitant que la discussion ne s'engage sur un terrain

qui n'a que peu de rapport avec le sujet abordé. Parfois, pour rendre les débats plus clairs, il résume les différents points de vue exprimés, et ce n'est que tout à la fin qu'il précise lequel est correct. En d'autres termes, il ne cherche pas à corriger mais à faire en sorte que chaque opinion soit aussi clairement exprimée et argumentée que possible.

La partie en noir et blanc du film montre les discussions de trois groupes différents : un groupe de lycéens de 1ère C (lycée Lakanal) et deux groupes d'étudiants de deuxième année de D.E.U.G. (Paris VII). Chaque discussion a duré plus d'une heure.

Dans chaque groupe, la même question a été posée : "Vous avez vu comment le film a été tourné : il y a donc eu truçage. Y a-t-il un moyen de s'en apercevoir et si oui lequel ?". Cette question, apparue spontanément avec le premier groupe, a été ensuite utilisée pour les autres car elle a permis un démarrage rapide de la discussion.

La première réponse a toujours été la même : en regardant bien, on doit voir le truçage (par exemple les déplacements par à-coups de l'affiche). Ce type de problème technique a rapidement été éliminé et la question initiale à nouveau posée. Tous sont unanimes à penser que le personnage qui lance le ballon au-dessus de sa tête ne pourrait pas le recevoir dans ses mains s'il se trouvait sur un vrai tapis roulant, à cause de la résistance de l'air. L'animateur a donc demandé de négliger la résistance de l'air, et pour cela a remplacé le ballon par une bille d'acier ou une clé. Le déroulement de la discussion varie, à ce niveau, d'un groupe à l'autre :

. le groupe de lycéens a consacré la quasi-totalité de la séance à étudier le problème du ballon (c'est-à-dire savoir où retombe un objet - clé, bille ou ballon - lancé en l'air par un personnage situé sur un tapis roulant). L'animateur a été amené à proposer de comparer deux situations différentes : celle d'une clé lancée en l'air dans le couloir d'un train et celle du ballon ou une clé lancé du tapis roulant. Cela conduit une lycéenne à faire une très belle démonstration :

partant du principe qu'une clé lancée en l'air dans le couloir d'un train retombe dans les mains, elle supprime le toit, puis les fenêtres du train pour arriver à une plateforme équivalente au tapis roulant. Pour s'assurer que le problème de l'entraînement était bien compris, l'animateur a posé aux étudiants le problème suivant : "un cantonnier se trouve près d'une voie ferrée, un train arrive derrière lui et le double. Si un voyageur du train laisse tomber, sans le lancer, une bouteille par la fenêtre et si le cantonnier reçoit cette bouteille, le recevra-t-il dans le dos ou dans la figure ?".

Certains (très peu) avaient encore quelques réticences à tenir compte de la "vitesse horizontale de la bouteille" après qu'elle ait été lâchée, ce qui les a conduit à inventer des exemples (en particulier comparer le mouvement d'un plomb lancé horizontalement par un fusil - immobile sur la terre - avec une vitesse horizontale de 140 km/h et celui d'une clé lâchée d'un train roulant à 140 km/h) qui leur ont permis de comparer, de modifier les deux points de vue et d'arriver ainsi à des résultats cohérents. Ce souci de cohérence fut une caractéristique essentielle de ce groupe, caractéristique absente dans les autres groupes ;

. le premier groupe d'étudiants "aborde" également le problème du ballon. Un étudiant - que nous appellerons le professeur - est de suite convaincu que le ballon retombe dans les mains du personnage. Son argumentation ressemble fort à un cours magistral : il part d'une vitesse \vec{v}_0 , d'une vitesse relative \vec{v}_r et d'une vitesse d'entraînement pour arriver à une vitesse absolue \vec{v}_a ; il utilise des notations, la loi de composition des manuels... : le résultat est instantané, il ne réussit absolument pas à convaincre ses camarades, et suscite plutôt leur ironie.

Ce même groupe a ensuite discuté du problème des trajectoires et des distances parcourues (sont-elles les mêmes ou non dans les deux référentiels ?). Là encore, le professeur se retrouve tout seul en désaccord avec ses camarades.

. Contrairement au précédent, le deuxième groupe d'étudiants a paru résoudre très vite le problème du ballon. La discussion s'est ensuite engagée sur le problème des trajectoires. Au bout d'un moment, il est apparu que la compréhension du problème du ballon n'était peut-être pas parfaite : l'animateur leur a posé la question du can-tonnier et de la bouteille : presque tous les étudiants, oubliant leurs réponses initiales, ont alors réagi comme ceux des autres groupes.

2. Analyse des discussions

Celles-ci sont fort riches et révèlent bon nombre de difficultés qui ne sont pas toujours liées aux changements de référentiels. Malgré l'intérêt de ces dernières, nous ne les étudierons pas afin de ne pas nous éloigner du cadre de ce travail.

Les problèmes abordés par chacun des groupes étant de même nature, nous analyserons l'ensemble des discussions, sans chercher à étudier les réactions et l'évolution d'un groupe particulier.

a) Le problème du ballon

La question est donc de savoir si un objet (ballon, bille, clé) lancé en l'air par un personnage situé sur un tapis roulant, retombe dans les mains ou derrière le lanceur. Cette question est importante aux yeux des étudiants car si le ballon retombait derrière, cela permettrait de s'apercevoir du trucage. Pour la majorité des étudiants, le ballon retombe derrière le lanceur : plusieurs types d'explications sont fournies.

1 - La résistance de l'air

Tous les étudiants pensent, au départ, que le ballon du film retomberait derrière le lanceur (si celui-ci était sur un vrai tapis roulant) à cause de la résistance de l'air. :

"Normalement, il (le ballon) devrait avoir un léger mouvement en arrière ;

- A cause de quoi ?

- De la résistance de l'air".

Or, le ballon du film est un gros ballon gonflé à l'hélium et il est fort probable que ce ballon lancé par un personnage situé sur un tapis roulant ne retomberait pas tout à fait dans ses mains, à cause de la résistance de l'air. Que les étudiants justifient leur première réponse en s'appuyant sur cet argument n'est pas pour surprendre. Cependant, au fil de la discussion, on s'aperçoit que la résistance de l'air ne suffit pas à expliquer la totalité des réponses. On constate, tout d'abord que les réponses sont les mêmes lorsqu'on dit explicitement de négliger la résistance de l'air ("la ballon tombe derrière") ou que l'on remplace le ballon par une clé ou une bille d'acier. La mécanique quotidienne étant une mécanique avec frottement, il est possible que les étudiants aient beaucoup de mal à imaginer des situations sans frottement. Cependant, nous trouvons alors des réponses qui sont contradictoires du point de vue du physicien. C'est ainsi que :

- les étudiants admettent sans problème qu'une clé lancée en l'air par un personnage debout dans le couloir d'un train retombe dans les mains ("dans le train... elle retombe dans les mains"), alors que cette même clé lancée du tapis roulant retombe derrière le lanceur, même lorsque la résistance de l'air est négligée.

Ces réponses sont a priori compatibles avec l'argument résistance de l'air, si l'on admet que celle-ci n'intervient pas dans le train : ce qui est peut-être plus facilement envisageable dans un train que sur un tapis roulant. Cette argumentation ne tient plus dès que l'on s'intéresse aux commentaires fournis par les étudiants. En effet, si l'objet retombe dans les mains, dans un train, c'est parce que :

"tout se déplace en même temps",

"l'air s'est déplacé"

"dans le train, tout est entraîné".

Si, maintenant, il n'y a pas d'air dans le train (un train dans le vide), l'objet tombe derrière :

"s'il n'y a pas d'air, il (le lanceur) le retrouve derrière".

Ainsi, selon qu'il y ait ou non de l'air dans le train, l'objet tombe ou non dans les mains du lanceur. Le problème n'est donc pas lié à la résistance de l'air mais à un entraînement de l'objet par l'air, lui-même entraîné par le train, entraînement qui disparaît dès qu'il n'y a plus d'air ou que l'air n'est pas entraîné comme dans le cas du tapis roulant.

- De la même façon, la résistance de l'air ne peut expliquer les réponses suivantes : un objet lâché par un personnage debout sur un tapis roulant tombe à ses pieds alors que lancé en l'air, il tombe derrière :

"Question : si tu lâches la clé sur le tapis roulant, à un mètre au-dessus de ton pied, qu'est-ce qu'elle fait ? Elle tombe sur ton pied ou à côté ?

- Elle tombe sur les pieds.

Q. : Et le ballon lancé verticalement ?

- Il tombe derrière toi."

Si la résistance de l'air était le seul élément réellement pris en compte, elle devrait intervenir de la même façon lorsque l'objet est lâché ou lancé. Or c'est loin d'être le cas.

2 - Autres explications

Les explications accompagnant les réponses "le ballon tombe derrière" font explicitement intervenir des arguments que nous avons rencontrés dans le modèle naturel. En voici divers exemples :

(Aspect explicatif) :

- "Pendant que le ballon est en l'air, le tapis a avancé. Il n'existe plus de lien physique entre le ballon et le tapis ; le ballon perd instantanément sa vitesse horizontale".

- "Le ballon quand il est en l'air n'est plus entraîné par le tapis roulant".

- "Quand le ballon est sur le sol, il bouge avec le sol ; quand il est en l'air, l'air n'a plus aucun contact avec le sol".

- "A l'instant où le bonhomme lance le ballon, il n'y a plus de vitesse horizontale".

- "Si le ballon est très léger, il reste longtemps en l'air et le tapis a le temps de se déplacer. Donc cela dépend de la hauteur à laquelle on lance la bille. On lance très haut, le temps qu'elle redescende, on a avancé : c'est logique".

(Aspect descriptif) :

- "Le ballon monte et descend à la verticale".
- "Le ballon tombera à la verticale".

(Mélange des deux) :

- "Le ballon tombera à la verticale mais le gars se sera déplacé".
- "Le bonhomme avance et la bille est restée en l'air".
- "Le ballon part verticalement, le type avance pendant ce temps-là".
- "Je lance un ballon vertical, il monte puis redescend, mais toi pendant ce temps-là tu as avancé".

Tous ces arguments sont interchangeables, l'étudiant passe facilement de l'un à l'autre mais peut aussi utiliser les deux en même temps.

Soulignons, au passage, que cette notion de verticale, si souvent citée, exclut toute intervention de la résistance de l'air ou du moins comme l'analyse physique correcte de son effet puisqu'alors l'objet devrait suivre une courbe et non une verticale. En revanche, les explications se comprennent très bien à l'aide du modèle naturel : la vitesse d'entraînement disparaît avec le lien qui assurait celui-ci et l'objet a une trajectoire : la verticale. Le mouvement de l'objet est analysé à partir des moteurs (muscles du lanceur et le poids lorsque l'objet est en l'air) et non par rapport à des observateurs.

Par exemple, lorsque les lycéens comparent ce que fait un plomb lancé horizontalement par un fusil (situé sur le sol) avec ce que fait une clé lâchée d'un train, l'un dit :

"Je ne comprends pas. Lorsqu'on tire un coup de fusil, il y a une force qui pousse le plomb ; quand on lâche la clé, il n'y a plus de force qui pousse la clé".

Pour qu'il y ait vitesse (ou force), il faut qu'il existe un moteur qui la crée.

Les deux aspects du modèle naturel sont étroitement imbriqués l'un dans l'autre : l'objet suit une verticale parce qu'il n'y a pas de moteur qui lui communique une vitesse horizontale, et c'est à ce moment-là que "la résistance de l'air" (au sens de l'étudiant) intervient. En effet :

"Attends, moi je te dis que quand tu la lances, la clé dans le train, elle tombera avec un certain angle. Tu lances hors du train, elle tombera aussi avec un certain angle.

- Ce n'est pas le même !
- Si, en négligeant la résistance de l'air.
- Mais non puisque tu as du vent.
- Ah, commence pas avec le vent !".

La résistance de l'air est ici assimilée au vent - cause motrice d'un mouvement horizontal. La prise en compte des moteurs est donc un élément déterminant.

On retrouve une version affaiblie de cet aspect avec l'étudiant "professeur" qui, rappelons-le, est le seul à donner d'entrée de jeu, la réponse correcte. Il parle de "repères fixes", "non fixes", de "vitesse absolue", puis :

"Si on parle d'un repère absolu (repère de Copernic), obligatoirement tout s'éclaire. On peut définir le déplacement d'un repère galiléen par rapport à un repère absolu alors que discuter du déplacement par rapport à deux repères qui bougent, deux repères galiléens, ça se complique".

Cet étudiant a besoin de se rattacher à un repère absolu (cf. partie historique) dans lequel sont définis les "mouvements", c'est-à-dire ceux créés par les moteurs.

Notons, pour terminer, la réponse de l'un de ses camarades :

"Si tu te bases uniquement sur les bonshommes et le ballon, y'a pas de problème ; tu n'as pas besoin de définir un autre système".

Cette dernière citation est limpide : inutile d'introduire des référentiels, il suffit de considérer les objets et leurs moteurs qui se déplacent dans un espace unique, constitué tout simplement des différents objets et moteurs en présence. Dans ce cadre, il devient parfaitement inutile de raisonner en termes de référentiels. C'est bien ce que l'on a constaté ci-dessus : les lycéens parlent d'angle

sans chercher à savoir par rapport à quoi est défini cet angle, tout comme ceux (lycéens et étudiants) qui introduisent la notion de verticale : là encore, inutile de préciser par rapport à qui ; il s'agit de LA VERTICALE. Tout ceci est cohérent avec l'existence d'un espace unique de description, puisqu'alors le mouvement et la trajectoire de l'objet sont uniques.

On trouve trace de cet espace à de nombreuses reprises : Lorsque la clé est lancée dans le train, un étudiant nous dit :

"La clé ne bouge pas" (sous-entendu horizontalement) ; lorsqu'elle est lâchée par la fenêtre :

"Elle tombera au même endroit que l'endroit où on était à l'instant où on l'a lâchée".

L'objet est à un endroit (il ne peut se trouver au même instant en deux endroits différents) et cette position est figée ou encore "posée" dans cet espace (que ce soit celui du train "mobile" ou celui du paysage "immobile"). Le train a l'avantage de constituer un référentiel très localisé dans lequel il est facile de raisonner : les murs ne bougent pas par rapport à celui qui est dans ce train : d'où "la clé ne bouge pas".

Si l'on demande des précisions sur ces types de réponses, on a vu plus haut que si la clé retombe dans les mains (dans un vrai train), c'est parce que l'air du train est entraîné avec le train. En effet, s'il n'y a plus d'air (train dans le vide), le couloir du train devient équivalent à l'espace du paysage :

"dans un train dans le vide, il (l'objet) reste toujours dans le même plan vertical par rapport à l'endroit où il est (il tombe derrière le lanceur)".

Ce plan est défini par rapport à l'objet et non par rapport à un observateur.

Les étudiants admettent difficilement l'équivalence cinématique de toutes ces situations, puisque les moteurs changent d'une situation à l'autre. Ainsi, chacun désire continuer à raisonner soit dans le train, soit dans l'air du paysage. En effet :

Reprenons un extrait de dialogue entre lycéens : l'une est convaincue que la clé lancée en l'air retombe dans les mains du lanceur (situé sur un tapis roulant) et tente de convaincre l'un de ses camarades :

"- Ecoute, Jean-Marc, tu es dans un train, dans le couloir. Tu lâches ta clé, elle te tombe à tes pieds, elle ne fait pas une verticale. Si elle avait fait une verticale, elle serait tombée vers la fenêtre arrière. Tu es d'accord avec moi ou pas, si elle avait fait une verticale par rapport au sol du paysage ?

J.M. - Mais puisque tu es dans le train

.....

J.M. - Dans un train complètement ouvert ?

- On s'en fout ouvert ou fermé.

J.M. - Mais non justement.

- C'est la même chose.

J.M. - Non puisque c'est dehors.

- Qu'est-ce que ça veut dire dehors ? Dehors pour toi, la différence, c'est qu'il y a du vent. Or le vent on s'en fout.

J.M. Je ne suis pas convaincu".

Ayant réalisé que la verticale ne se transportait pas en bloc d'un lieu à un autre, elle insiste fortement sur le fait que cette clé ne suit pas une verticale... (qui, au début de son discours, n'est pas clairement définie) car c'est effectivement le nœud de l'affaire. En revanche, son camarade tient absolument à garder le train complet pour pouvoir raisonner dans ce référentiel très localisé : ce dernier devient alors un handicap.

L'expérience quotidienne est également un handicap. En effet : une étudiante n'arrive pas à se convaincre que le cantonnier ne recevra jamais la bouteille dans la figure car :

"Si on lance une cigarette, une bouteille ou autre chose, ça part du côté opposé de la vitesse comme sur un bateau".

Il est vrai qu'en bateau, en voiture, on "voit" partir en arrière tout objet lâché. Cette expérience quotidienne est ici analysée en termes de moteurs, la vitesse d'entraînement disparaissant spontanément et le vent "poussant" l'objet dans la direction opposée. C'est sans doute l'expérience quotidienne qui est à l'origine de certaines réponses correctes : pour tous les étudiants, il va de soi qu'une clé

par un personnage situé sur un tapis roulant tombe aux pieds du personnage. L'animateur n'a pas demandé d'explicitier ce type de réponses mais on peut penser que l'étudiant se réfère d'une part à l'expérience quotidienne et, d'autre part, aux jambes du personnage : la clé suit une verticale matérialisée par les jambes qui servent de points de repère. Avec cet exemple, et celui du train, on peut dire que l'étudiant raisonne par rapport à d'autres objets ou encore dans un référentiel, mais ce dernier est très localisé dans l'espace ; il faut que l'objet lui soit lié physiquement (train) ou qu'il reste très proche des bornes limitant ce référentiel (clé tombant aux pieds du personnage). Dès que l'objet quitte ce "référentiel localisé" (objet lâché par la fenêtre d'un train ou lancé en l'air d'un tapis roulant), l'étudiant change spontanément de points de repère ou, dirait le physicien, de point de vue, ce qui ne le gêne pas puisque les mouvements décrits sont déclarés être les mêmes pour tous les observateurs. En d'autres termes, lorsque l'objet passe d'un espace (train) à l'autre (paysage), la nature du mouvement de l'objet change mais sa description est unique et ne dépend aucunement de l'espace dans lequel se trouve l'observateur.

b) Les distances parcourues, les trajectoires : mouvements vrais et apparents

Dans la salle de discussion, on a accroché une photographie extraite du film couleur où l'on voit, en haut, la trajectoire du ballon dans le référentiel du tapis et, en bas, sa trajectoire dans le référentiel du quai. Sur la photographie du haut (les bonshommes sont fixes dans le référentiel du tapis), la trajectoire aller est la même que la trajectoire retour ; sur la photographie du bas (référentiel du quai, les bonshommes ne sont plus fixes), les trajectoires aller et retour du ballon ne sont plus les mêmes. Sur ces photographies figurent également les deux personnages, qui, bien entendu, sont à la même distance dans les deux cas puisqu'il s'agit de deux photos prises au même instant.

Bien que les trajectoires, matérialisées par des points blancs, soient différentes, les distances parcourues sont très souvent déclarées identiques. Par exemple :

- "- Si on regarde uniquement les deux bonshommes, la distance matérielle est la même.
- Qu'est-ce que la distance matérielle pour toi ?
- C'est celle que l'on peut mesurer".

Question :

"La distance parcourue est-elle la même quand le ballon va de gauche à droite ou de droite à gauche (photo du bas) ?".

Réponse :

"OUI, mais les bonshommes ne les voient pas de la même façon donc les trajectoires ne sont pas les mêmes. Horizontalement, la distance parcourue est la même".

Certains analysent assez correctement la situation :

"Disons qu'il faudrait faire intervenir la distance qu'a parcourue la caméra... et la distance totale, ce sera soit l'addition des deux, soit la soustraction des deux... suivant le sens de déplacement de la caméra".

"Quand il (le ballon) avancera dans le sens de marche du chariot, il en fera un peu plus, il en fera x de plus qui sera déduit de la distance quand le ballon arrivera en sens inverse".

Ces dernières citations se réfèrent aux deux trajectoires prises dans le référentiel du quai qui sont différentes à l'aller et au retour. Cependant, un nombre assez élevé d'étudiants pensent que les distances parcourues, dans les deux référentiels, sont les mêmes et que si les trajectoires visualisées sont différentes (elles le sont sur les photos), c'est une illusion : on voit alors apparaître les notions de mouvements vrais et apparents :

"Le mouvement réel du ballon est le déplacement du haut car pas de déplacement par rapport aux deux bonshommes".

Question :

"Y a-t-il un trajet plus réel que l'autre ?

Réponse :

"Non, mais celui du haut est tout de même plus réel".

Question :

"La distance parcourue par le ballon est-elle la même ?".

Réponse :

"Oui, elle est la même, on n'a peut-être pas l'impression

visuellement que c'est la même, mais c'est la même".

Question :

"C'est une illusion ?"

Réponse :

"Oui, due à la position des caméras".

Question :

"Pourquoi les trajectoires sont-elles différentes ?"

Réponse :

"C'est dû aux caméras".

Question :

"Est-ce une impression ?"

Réponse :

"Oui, c'est fonction du déplacement, du repère".

Si les distances paraissent différentes, c'est une illusion optique due aux positions des caméras et non parce qu'elles sont mesurées dans des référentiels différents. On retrouve ces notions de mouvements vrais et apparents à l'occasion du truçage.

"Si on (le tapis roulant) allait plus vite, on pourrait distinguer le truçage car sont superposés un mouvement réel et un mouvement apparent".

Après demande d'explication de ces termes, cet étudiant ajoute :

"Un mouvement apparent est celui que l'on voit, un mouvement réel est celui qui se passe physiquement, ils peuvent être différents. Maintenant, il ne se passe peut-être pas ce que l'on voit".

Puis explicite encore sa pensée en s'aidant des trajectoires :

"S'il y avait un seul mouvement, on devrait voir les mêmes courbes ; donc il y a un mouvement réel et un mouvement apparent. La courbe réelle est celle qui est prise par la caméra du haut (celle où les personnages sont fixes sur l'écran, c'est-à-dire celle qui se trouve sur le tapis roulant)".

Cette définition du mouvement réel, physique, est limpide : c'est celui qui est communiqué par le moteur-muscles du lanceur ; le mouvement apparent est celui qu'on voit et qui ne peut être expliqué par le seul moteur propre.

Ce même étudiant précise ensuite :

"C'est un peu comme des stroboscopes. Par exemple, dans un stroboscope, on fait tourner un disque avec un point. Si on fait varier la vitesse du disque sans changer celle du stroboscope, on verra un mouvement apparent du point. Là il se produit un peu la même chose".

Nous sommes très loin d'une compréhension cinématique du problème. Les vrais mouvements sont ceux des moteurs, les autres sont des illusions qui n'ont aucune réalité.

3. Deux remarques en guise de conclusion

Nous ne pouvons abandonner ces discussions sans relever deux faits qui nous semblent importants. L'un concerne le rôle de l'animateur. Nous avons précisé au début de ce paragraphe que les discussions étaient peu guidées ; mais elles n'auraient peut-être pas existé si l'animateur n'avait pas été préalablement prévenu des difficultés liées à la cinématique. En effet, il aurait pu s'en tenir aux premières réponses fournies (le ballon tombe derrière à cause de la résistance de l'air) et le sujet aurait été abandonné. C'est en obligeant les étudiants à expliciter leurs points de vue, à préciser leurs argumentations que l'animateur a réussi à faire en sorte que les explications apparaissent sous une forme claire et non ambiguë.

Il faut par ailleurs noter la grande différence de comportement entre étudiants et lycéens à des phrases apprises dans le cours comme : "tout est relatif", cela dépend des repères, avec un repère galiléen"... Seul l'étudiant "professeur" a correctement utilisé le cours enseigné : il n'a provoqué que des rires de la part de ses camarades et n'a surtout pas réussi à les convaincre. En revanche, les lycéens n'avaient aucun cours de physique sur lequel ils pouvaient s'appuyer : ils ont donc essayé de résoudre les problèmes abordés avec un langage simple, ont inventé des exemples et des contre-exemples afin de s'assurer de la cohérence de leurs réponses. Ils sont tous partis enchantés "ayant appris plus de physique en une heure et demie qu'en un an au lycée", opinion discutable mais reflétant à la fois le plaisir pris à la discussion et la satisfaction d'avoir appris quelque chose, contrairement à bon nombre d'étudiants qui sont repartis comme ils étaient arrivés.

IV. LA CINEMATIQUE ET LES ENFANTS

Il est intéressant de regarder comment les enfants se comportent lorsqu'ils doivent résoudre des problèmes simples de cinématique, et d'analyser ces comportements en référence aux raisonnements naturels dégagés plus haut.

Nous nous référerons, dans un premier temps, aux travaux réalisés à l'Institut des Sciences de l'Education de Genève. Piaget et ses collaborateurs ont, en effet, étudié l'évolution des structures opératoires (logico-mathématiques) que se constitue l'enfant et les possibilités d'explications du monde physique, que Piaget appelle la causalité.

Piaget démontre qu'il existe un ordre hiérarchique des structures opératoires et définit ainsi un certain nombre de stades par lesquels l'enfant passe nécessairement. Il montre, par ailleurs, que les deux systèmes (structures opératoires et explications causales) interagissent continuellement de telle sorte que "les stades observés au cours du développement de la causalité correspondent de façon assez générale à ceux des opérations" (Explications Causales⁸, p. 10).

Piaget s'est, en particulier, attaché à étudier la façon dont chez les enfants, se construisent les concepts élémentaires de vitesse et de distance parcourue. Bien qu'une étude approfondie de la composition de mouvements définis dans des référentiels différents n'apparaisse pas dans l'oeuvre de Piaget, on constate qu'il a analysé quelques compositions de ce type afin d'enrichir et de compléter son analyse de l'acquisition de ces concepts.

Nous rappellerons tout d'abord les conclusions auxquelles est arrivée l'Ecole de Genève quant aux concepts de cinématique élémentaire, puis analyserons les deux expériences qui font intervenir les changements de référentiels, analyse qui laisse supposer que les raisonnements du type de ceux que l'on rencontre dans le modèle naturel sont déjà présents chez l'enfant.

Nous terminerons par la description et l'analyse d'une expérience que nous avons réalisée avec des enfants, expérience construite dans le but de savoir si ces raisonnements existent ou non.

A. NOTIONS CINEMATQUES CHEZ L'ENFANT, selon Piaget

Plutôt que de paraphraser Piaget, nous citerons divers extraits de son analyse.

Jusqu'à 7-8 ans :

"L'intérêt des stades élémentaires observables chez l'enfant est de nous mettre en présence d'un concept initial de la vitesse de caractère ordinal et non pas métrique, et qui ne doit rien à la durée mais repose simplement sur l'ordre de succession spatial et temporel. Telle est la notion du "dépassement" qui implique, pour deux mobiles A et B, une inversion de l'ordre spatial AB en BA, entre un moment antérieur T_1 correspondant à AB et un moment ultérieur T_2 correspondant à BA. L'inconvénient de l'intuition du dépassement est qu'elle fournit seulement une comparaison des vitesses relatives de deux mobiles et ne permet pas la mesure d'une vitesse isolable⁹."

Par ailleurs, il a établi

"que le chemin parcouru, ou intervalle entre les points de départ et d'arrivée, restait indifférencié de l'ordre lui-même, tant que celui-ci demeure intuitif : d'une part, les distances franchies sont d'abord estimées en fonction des seuls points d'arrivée et, d'autre part, leur évaluation reste longtemps réfractaire à la partition et à la mesure à cause du caractère total et indivis du mouvement, en tant que changement de position orienté vers un but ou un terme final. Ce n'est que quand l'ordre atteint le niveau des opérations concrètes (7-8 ans) que les chemins parcourus sont conçus à titre d'intervalles ou distances emboîtables et susceptibles d'estimation opératoire qualitative ou métrique"¹⁰.

Il relie les possibilités opératoires de l'enfant au fait que le mouvement, à cet âge, est "force autant que vitesse et déplacement" et que :

"jusqu'à 7-8 ans inclusivement, tout mouvement englobe une force, sous la forme d'un "moteur interne" (comme l'admettait Aristote) et même si est reconnue en plus la nécessité d'un "moteur externe". La notion primitive semble être celle de l' "action" au sens de fte ou de mve, ce qui rend toute cinématique solidaire d'une dynamique¹¹".

De 9 à 13 ans :

"la notion de chemin parcouru ne se dessine clairement qu'à titre d'intervalles entre les points ordonnés de départ et d'arrivée¹², "après que l'enfant se soit constitué certaines possibilités opératoires. Celles-ci sont liées au fait que : "au niveau IIB où la force se différencie relativement du mouvement, le moteur externe suffit à expliquer celui-ci, qui se réduit en ce cas à un simple déplacement, tandis que géométriquement ce dernier est mis en référence avec un système immobile et extérieur de coordonnées¹³."

Piaget conclut alors qu'à 11-13 ans, l'enfant, considérant "la vitesse comme une relation e:t"¹⁴ "est capable de se mouvoir avec aisance et subtilité dans ce problème* de relativité"¹⁵.

B. ETUDE DES DEUX EXPERIENCES PIAGETIENNES LIEES AUX CHANGEMENTS DE REPERES

1. Expérience de l'escargot¹⁶

Elle a pour but d'étudier les mouvements relatifs, et en particulier la composition des distances parcourues. Le matériel expérimental utilisé est très simple : un escargot se déplace sur une planchette, elle-même mobile. Selon les sens de déplacement de l'escargot sur la planchette et de la planchette sur la table, les enfants doivent déterminer le point d'arrivée de l'escargot dans la

* Il s'agit des problèmes de composition de mouvements relatifs que nous allons étudier maintenant.

pièce. L'expérience est réalisée devant eux puis le matériel étant écarté, les enfants doivent déterminer ce point d'arrivée à l'aide de bandes de carton qui matérialisent les trajets de l'escargot sur sa planchette et de la planchette par rapport à la table.

L'enfant doit donc déterminer le point d'arrivée sur la table en composant les déplacements (les bouts de carton) de l'escargot sur sa planchette et de la planchette sur la table : la situation ainsi proposée est une situation d'entraînement de l'escargot par la planchette.

Piaget déduit, de la façon suivante, le comportement des enfants de 9 ans :

"Lorsque l'escargot et la planche se meuvent dans le même sens, l'enfant voit fort bien, au moment de la perception des données, que la planche entraîne l'escargot, mais, au moment de reconstituer le trajet de ce dernier en reportant la longueur mesurée, le sujet ne comprend pas que le point de départ de ce trajet a été lui-même entraîné par la planche et que le problème est justement de savoir de combien il a été entraîné : par le fait que ce point de départ a coïncidé, au début du mouvement de la planche, avec la ligne de repère d'où sont partis simultanément la planche et l'escargot, l'enfant s'obstine à calculer le trajet de l'escargot depuis cette ligne, comme si le point de départ de l'escargot était absolu et non relatif à la planche elle-même. En d'autres termes, c'est l'absoluité attribuée au point de départ du mouvement relatif qui empêche de composer celui-ci avec le mouvement absolu : c'est donc à nouveau une question d'ordre qui fausse la composition des longueurs dans le cas du problème I. Quant à la question II, lorsque l'escargot se dirige d'un côté et la planche de l'autre, le mouvement de l'escargot est conçu comme se déroulant complètement du premier côté : s'il est parti sur la gauche de la ligne de repère, l'enfant mettra donc la bande de papier, servant de mesure, tout entière sur la gauche sans tenir compte du fait que la planche entraînait le mouvement sur la droite¹⁷.

Notons que l'on retrouve chez ces enfants certaines caractéristiques du modèle naturel : les seuls déplacements considérés sont les déplacements propres et le point de départ de l'escargot est figé, puisque absolu. Cependant, contrairement à l'adulte, il n'arrive pas, avec cette situation d'entraînement, à coordonner les déplacements

propres. Cette coordination ne peut se faire, comme le montre Piaget, que lorsque sont constituées certaines structures opératoires, structures que possède l'enfant de 10-12 ans. En effet, à cet âge, l'entraînement de l'escargot par la planchette est bien perçu et compris¹⁸ :

"Do (9;II) : Q1 (les deux dans le même sens) : l'escargot a aussi avancé, en même temps que la planche. Q2 (les deux en sens inverse) le carton a été en arrière et l'escargot en avant".

Jac (II;4) : Q2 : "l'escargot a fait le trajet et en même temps qu'il avance, la planche recule de ça".

Dol (12;8) Q2 : "c'est comme si la route s'en irait en arrière quand il avance".

Gil (10;3) Q2 : "le carton a fait faire moins de chemin à l'escargot".

Piaget déduit de ces commentaires que les enfants composent les distances*. Cependant s'il est vrai que les enfants additionnent ou retranchent les déplacements propres (matérialisés par des bouts de carton), rien dans les commentaires cités ne permet de savoir si cette composition est une composition cinématique ou plutôt une simple combinaison des effets des deux moteurs en présence, comme pour les adultes.

Ce point sera éclairci plus loin lorsque nous analyserons l'expérience que nous avons réalisée avec des enfants.

2. Expérience des cyclistes¹⁹

Cette expérience a été réalisée, selon les termes de Piaget, dans le but "d'analyser un problème de vitesses relatives, c'est-à-dire de coordination de deux vitesses en une vitesse apparente unique" (p. 173).

Sur un ruban pouvant se déplacer à vitesse constante, sont

* La notion de mouvement et de vitesse chez l'enfant (p. 280)

fixés huit cyclistes en carton. Parallèlement à ce ruban, une ficelle tendue porte un bonhomme représentant l'observateur qui compte le nombre de cyclistes passant devant lui, cet observateur pouvant être également en mouvement. Les enfants doivent prévoir combien le bonhomme verra de cyclistes passer devant lui pendant 15 secondes lorsqu'il marche dans le même sens que les cyclistes ou en sens contraire.

Jusqu'à 8 ans, dit Piaget

"les sujets ne composent pas les mouvements en jeu ni leurs vitesses... Le sujet ne s'occupe donc que de la longueur du trajet du bonhomme et non pas de sa longueur relative au mouvement des cyclistes dans le même temps"²⁰.

Là encore, la coordination des différents mouvements n'est possible que lorsque se sont constituées certaines possibilités opératoires, ce qui est le cas, dit Piaget, pour les enfants de 11-13 ans. Les enfants de cet âge font effectivement des prévisions correctes et justifient leurs réponses :

Net (11;6) : "(même sens) - Il en verra moins, parce que les cyclistes vont vite et que lui il avance aussi. - (Exp.) - Oui, il va plus lentement qu'eux, et parce qu'il avance en même temps qu'eux il faut du chemin. - (Sens contraire) - Il en verra moins aussi. C'est la même chose qu'avant (= même sens), mais le contraire... Ah non, c'est "plus" qu'il en verra, parce qu'il va en sens inverse. Là il y a quelque chose qui avance et là quelque chose qui recule : les cyclistes ont moins de chemin à faire".

Pan (9;8) : "(Même sens) - Il en verra moins, parce qu'il les suivra et n'en verra pas passer autant. - (Sens contraire) - Il en verra plus. Il va deux fois plus vite parce que les cyclistes vont en sens inverse. Il les voit passer plus vite. - Pourquoi ? - Parce que quand une voiture nous croise, on la voit passer plus vite. Le bonhomme et les cyclistes font chacun un bout de trajet : ça va plus vite".

Ter (10;4) : "(Même sens) - Il en verra moins. Les cyclistes mettent plus de temps pour rattraper le bonhomme. - (Sens contraire) - Il en verra plus qu'au début. Quand il est immobile, les cyclistes mettent plus de temps pour venir. Quand il marche, ils mettent moins de temps parce qu'ils ont moins de trajet à faire. - Pourquoi ? - Le bonhomme fait le trajet à leur place".

Pol (10;5). Même sens : "Il en verra moins, parce qu'il avance en même temps. S'il va à la même vitesse que les cyclistes, il n'en verra qu'un... Ca dépend de la vitesse du bonhomme". Et pour les sens contraires : "Il en verra plus. Lorsqu'il va à leur rencontre, les cyclistes peuvent le croiser plus vite : ils ont moins de parcours à faire pour le rattraper".

Chap (11 ans). Même sens : "Moins. Comme il avance, les cyclistes le rattraperont moins vite". Sens inverse : "Il en verra plus qu'en restant immobile, parce qu'il va à leur rencontre. Ca revient au même que si les cyclistes allaient plus vite. - Ils vont vraiment plus vite ? - Non, toujours à la même vitesse, mais il semble seulement qu'ils vont plus vite".

Saut (12;5). Même sens : "Moins : il va en avant et les cyclistes auront moins vite fait de le rattraper". Inverses : "Plus. Ça fait comme si les cyclistes allaient plus vite : ils mettent moins de temps pour le rattraper".

Nar (12;7). Même sens : "Il en verra moins : les cyclistes mettront plus de temps pour le rattraper". Sens contraire : "Il en verra plus qu'avant : ce sera le contraire. Il est plus rapproché des cyclistes : lorsque le bonhomme marche, les cyclistes viennent plus vite".

Bai (13;0). Même sens : "Moins, parce qu'ils doivent le rattraper et qu'il prend de l'avance". Sens contraire : "Plus, parce que les cyclistes passeront plus vite devant lui. En réalité, ils vont à la même vitesse, mais ils gagnent du chemin".

Piaget analyse ces commentaires de la façon suivante²¹ :

"Nous avons tenu à citer un certain nombre de ces réponses d'enfants de 9;8 à 13;0 ans pour montrer qu'il n'est nullement exagéré de parler d'une composition qualitative spontanée des mouvements, à l'âge des premières opérations formelles, et d'une compréhension très fine de la relativité des vitesses ainsi composées.

L'annonce de cette composition se fait déjà sentir dans la réaction intermédiaire de Net : après avoir supposé que les mouvements inverses de l'observateur et des cyclistes conduisent au même résultat que les mouvements de même sens, Net s'écrie : "Ah non... là il y a quelque chose qui avance, et là quelque chose qui recule", c'est-à-dire qu'il pressent un mécanisme opératoire réversible. Avec Pan, l'opération s'explique déjà : "le bonhomme va deux fois plus vite, parce que les cyclistes vont en sens inverse" de celui de

l'observateur, c'est-à-dire donc que les vitesses s'additionnent.

Et pour bien montrer que cette composition additive ne change rien aux vitesses absolues composées entre elles, Pan précise que ce résultat est relatif au point de vue de l'observateur : "il les voit passer plus vite. Quand une voiture nous croise, on la voit passer plus vite". Ter, de même, résume cette composition relative en disant que les cyclistes mettent moins de temps à rejoindre le bonhomme allant à leur rencontre parce que "le bonhomme fait le trajet à leur place". Pol procède par généralisation à partir de l'hypothèse "ça dépend de la vitesse du bonhomme" : à même vitesse que les cyclistes et dans le même sens, il n'en verra qu'un, etc., et à sens inverse il en verra d'autant plus que les cyclistes auront moins de parcours à effectuer. Chap trouve une formule relativiste frappante, en disant que si "le bonhomme va à leur rencontre, ça revient au même que si les cyclistes allaient plus vite", et il précise qu'il s'agit là d'une vitesse apparente ("il semble seulement qu'ils vont plus vite") qui se superpose à la vitesse absolue ("ils vont toujours à la même vitesse"). Saut reprend la même formule "Ça fait comme si les cyclistes allaient plus vite : ils mettent moins de temps... etc." ainsi que Nar ("lorsque le bonhomme marche, les cyclistes viennent plus vite") et Bai (ils "passeront plus vite devant lui : en réalité ils vont à la même vitesse, mais ils gagnent du chemin").

Ces commentaires et l'analyse qu'en donne piaget appellent un certain nombre de remarques :

- Les enfants raisonnent non pas sur les vitesses mais sur les trajets ou distances parcourues par le bonhomme et les cyclistes pour en déduire des temps plus longs ou plus courts : "quand il marche, ils mettent moins de temps parce qu'ils ont moins de trajet à faire", "il en verra plus...", "ils ont moins de parcours à faire pour le rattraper", "en réalité, ils vont à la même vitesse, mais ils gagnent du chemin", "les cyclistes ont moins de chemin à faire", "le bonhomme et les cyclistes font chacun un bout de trajet : ça va plus vite"...

Il faut noter que les questions portent sur un débit, c'est-à-dire le nombre de cyclistes qui défilent devant le bonhomme pendant un intervalle de temps donné et les variations de ce débit selon que le bonhomme se dirige vers les cyclistes en marche dans le même sens qu'eux

ou en sens contraire. Le problème revient à comparer le nombre de personnes que l'on croise selon qu'elles s'éloignent de vous ou qu'elles se dirigent vers vous. Pour résoudre un tel problème, il suffit de raisonner sur les distances parcourues dans un seul référentiel (celui du sol) et de comparer des temps. C'est bien ce qu'on observe dans les réponses des enfants : lorsque les cyclistes vont dans le même sens que le bonhomme, ils parcourent plus de chemin, mettent plus de temps et le bonhomme en voit moins ; alors qu'en sens inverse, chacun parcourt moins de chemin et le bonhomme en voit moins. Un tel raisonnement ne fait aucunement intervenir une composition de vitesses : seules les distances parcourues dans le référentiel du sol sont composées, pour en déduire, à l'aide de relations binaires bien connues du type "plus de chemin-plus de temps", des informations sur le nombre de cyclistes vus.

- Pour étayer sa démonstration, Piaget s'appuie sur le fait que certains enfants introduisent la notion de vitesse apparente.

Reprenons le commentaire de Pan "quand une voiture nous croise, on la voit aller plus vite". On constate alors que Pan dit "on la voit" et non "elle va" et qu'il prolonge son argumentation par "le bonhomme et les cyclistes font chacun un bout de trajet : ça va plus vite". Il raisonne sur les distances parcourues pour en déduire un temps plus court. Aucun élément ne permet d'en déduire qu'il compose des vitesses : on constate seulement qu'il se réfère à une observation visuelle, sans doute quotidienne.

De même, le commentaire de Ter ne résume aucunement "cette composition relative" puisqu'il s'appuie sur des temps déduits d'une composition (dans un seul référentiel) des distances parcourues.

Les mêmes remarques s'appliquent à l'ensemble des commentaires cités par Piaget : lorsque certains disent, par exemple, "ça revient au même que si les cyclistes allaient plus vite", il est vrai qu'ils introduisent la notion de vitesse apparente, mais on ne voit vraiment pas comment elle pourrait être obtenue à l'aide d'une composition des

vitesses. En revanche, les réponses deviennent limpides si l'on admet que les enfants raisonnent comme les adultes et "se mettent à la place de" (cf. Pan). Les vitesses en jeu sont les vitesses propres, la vitesse apparente étant alors le résultat d'une impression , déduite d'une observation visuelle.

3. Conclusion

Les raisonnements naturels des étudiants sont si stables et résistants qu'il nous a semblé raisonnable de penser qu'ils étaient déjà présents chez l'enfant. L'analyse que nous venons de faire ne contredit pas cette hypothèse mais ne la confirme pas vraiment. Le but de l'expérience que nous allons décrire est d'en trouver des confirmations plus précises.

C. DESCRIPTION ET RESULTATS DE L'EXPERIENCE ENFANTS*

La démarche suivie est similaire à celle que nous avons utilisée avec les étudiants : utiliser des situations de changements de référentiels afin de faire apparaître les invariants implicites des enfants - invariants géométriques liés aux positions des mobiles et invariants dynamiques liés à l'existence de la relation moteur-mouvement.

1. Principe de l'expérience

Le mouvement d'un objet est envisagé dans deux référentiels différents : celui de la terre (R_T), c'est-à-dire celui de la pièce dans laquelle a lieu l'entretien et celui de l'observateur - le sujet - éventuellement mobile par rapport au premier.

Si un observateur, le sujet, voit un objet se déplacer de droite à gauche, par exemple, cette même observation peut se faire pour des mouvements de l'objet et de l'observateur différents dans le réfé-

* Expérience réalisée en collaboration avec Mme L. Maury et V. Viennot²².

rentiel de la pièce (R_T). En effet, l'observateur verra toujours l'objet se déplacer de droite à gauche dans son référentiel, alors que dans R_T

- l'objet se déplace de droite à gauche, l'observateur étant immobile,

- l'objet est immobile, l'observateur se déplaçant de gauche à droite (situation I)

- objet et observateur se déplacent tous deux de droite à gauche. Il faut alors que, dans R_T , l'objet aille plus vite que l'observateur (situation II)

- objet et observateur se déplacent tous deux de gauche à droite. Dans ce cas, dans R_T , l'objet va moins vite que l'observateur (situation III)

- objet et observateur se déplacent en sens inverse (objet gauche et observateur droite). Nous n'avons pas étudié cette situation avec les enfants.

L'objet est un crayon, l'observateur est le sujet qui se trouve assis sur un fauteuil à roulettes pouvant se déplacer latéralement dans la pièce. Afin que le sujet n'ait accès qu'au mouvement du crayon par rapport à lui-même, on le fait regarder dans un tuyau qui limite son champ visuel : le sujet ne voit donc que le déplacement du crayon et le fond uni de la pièce (fig. 1). Sujet et expérimentateur étant assis l'un en face de l'autre, nous avons, pour éviter toute ambiguïté verbale sur les sens de déplacement, collé sur le tuyau des marques rouge et bleue qui représentent la droite et la gauche. De la même façon, la gauche et la droite sont repérées, dans la pièce, par la porte et la fenêtre de la pièce où l'on se trouve.

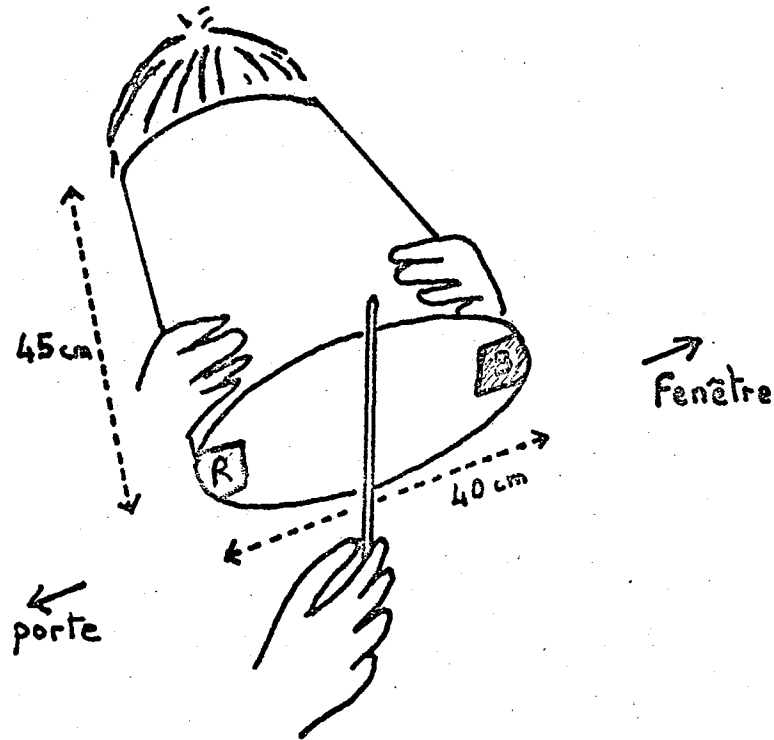


Figure 1

Le tableau I résume les différentes situations proposées.

Tableau I

Mouvement de l'objet par rapport au fauteuil	Milieu du tuyau ———> bleu			
Mouvement dans la pièce de l'objet du fauteuil	Présentation	Situation I	Situation II	Situation III
	————> F	0	————> F	P ←
	0	P ←	→ F	P ←

Les flèches indiquent les sens de déplacement, leurs longueurs relatives indiquent les vitesses relatives des modules des vitesses. Un zéro signifie un déplacement nul. P vers la porte, F vers la fenêtre.

A partir de ce schéma, nous avons monté trois expériences :

- Avec les expériences A et B, le support du moteur du crayon est dans le référentiel de la pièce, l'expérimentateur déplaçant le crayon. Dans l'expérience A, le mouvement observé du crayon est continu (du milieu du tuyau jusqu'à la marque bleue), alors que dans l'expérience B, grâce à un cache placé sur le tuyau, le sujet n'a accès qu'aux positions relatives initiale et finale du crayon par rapport au milieu du tuyau, c'est-à-dire par rapport à lui (sujet).

- Avec les expériences A et C, le mouvement observé est continu ; mais le référentiel dans lequel se trouve le moteur du crayon n'est pas le même : pour l'expérience A, ce moteur est dans le référentiel de la pièce, pour l'expérience C, c'est le sujet qui déplace le crayon, le support du moteur pouvant être mobile par rapport au référentiel de la pièce.

2. Déroulement des expériences

Le déroulement des trois expériences suit le même schéma général. Nous le décrirons intégralement pour l'expérience A. Pour les deux autres expériences (B et C), nous ne signalerons que les modifications apportées par rapport à l'expérience A.

Expérience A

On définit, pour le sujet, les déplacements possibles des objets dans la pièce : déplacements du fauteuil et du crayon de la porte vers la fenêtre et inversement.

On installe le sujet sur le fauteuil, le nez dans le tuyau. Il doit garder, autant que possible, le tuyau droit et ne pas le déplacer latéralement, car on lui explique que, si on déplace le fauteuil, l'ensemble sujet-fauteuil-tuyau doit se déplacer d'un seul bloc.

L'expérience comprend trois parties correspondant aux trois situations du tableau I. Au début de chaque partie, le fauteuil est fixe dans la pièce et l'on présente le mouvement du crayon dans le tuyau : déplacement du milieu du tuyau vers la marque bleue.

On demande ensuite au sujet :

"Comment se déplace le crayon dans le tuyau ?"

"Comment se déplace le crayon dans la pièce ?"

"Comment se déplace le fauteuil dans la pièce ?".

Cela ne pose pas de problème pour les sujets.

Partie I

Après la présentation que l'on vient de décrire, on pose la question Q1 :

"Est-ce que tu peux voir la même chose (crayon vers le bleu) dans ton tuyau, si le crayon est fixe dans la pièce ?".

Si la réponse est oui, on lui demande de dire comment il faut faire. S'il répond qu'il faut déplacer le fauteuil, il doit spécifier dans quel sens. Pour les autres types de réponses, on suggère que le fauteuil peut se déplacer dans la pièce. Si sa réponse devient : "oui, c'est possible en déplaçant le fauteuil", il doit là encore définir le sens de déplacement du fauteuil.

On note les réponses des enfants. Pour tous les cas de réponses erronées ou tant soit peu incertaines, nous avons fait systématiquement une démonstration* jusqu'à ce que le sujet se détermine définitivement sur une réponse (juste ou fausse). Ces démonstrations ne sont donc utilisées qu'en dernier ressort.

* Les démonstrations ne durent que 3 à 4 secondes. Le fond de la pièce joue un rôle négligeable : en effet, les démonstrations sont beaucoup trop rapides, l'enfant, suivant des yeux le mouvement du crayon, ne peut, durant ce délai très bref, accommoder sur le fond uni qui se trouve à deux mètres de lui.

Partie II

La situation correspondant à la partie II consiste à déplacer crayon et fauteuil vers la fenêtre. Le déplacement du crayon dans le tuyau est de même sens que celui qu'on décrit dans le repère du sol. Pour que cette situation soit possible, il faut que, dans la pièce, la vitesse du crayon soit supérieure (en module) à celle du fauteuil (cf. tableau I).

Après la présentation initiale, on pose la question de compatibilité sur les sens de la manière suivante : QII_g :

"Peux-tu voir cela (mouvement du crayon vers le bleu), si dans la pièce le crayon et le fauteuil se déplacent tous deux vers la fenêtre ?".

On note la réponse initiale, les démonstrations et changements de réponses éventuels, ainsi que les justifications fournies. Si cette situation II a été reconnue possible, on pose alors la question QII_v :

"Comment doivent-ils se déplacer ? à la même vitesse ou l'un va-t-il plus vite que l'autre dans la pièce ? alors lequel ?".

Partie III

On passe ensuite à la partie III qui correspond à la situation où fauteuil et crayon se déplacent dans la pièce vers la porte. Dans ce cas, les mouvements du crayon dans le tuyau et dans la pièce sont de sens contraire. Pour que cette situation soit possible, il faut que la vitesse du crayon, dans la pièce, soit inférieure (en module) à celle du fauteuil (cf. tableau I).

On présente le mouvement du crayon (fauteuil fixe) dans le tuyau. On le fait décrire à l'enfant. On pose alors la question QIII_g :

"Est-ce possible de voir cela (mouvement du crayon vers le bleu) quand, dans la pièce, on déplace le fauteuil et le crayon vers la porte ?".

Là encore l'enfant peut répondre par "possible" ou "impossible". On lui demande de justifier sa réponse et, parfois, comme pour les situations précédentes, on lui propose de réaliser la situation. Il peut alors changer d'opinion ou maintenir sa réponse initiale.

Lorsque cette situation III a été déclarée possible, on demande alors : QIII₇ :

"Comment doivent-ils se déplacer dans la pièce ? vont-ils à la même vitesse ou y en a-t-il un qui va plus vite que l'autre ? si oui, lequel ?".

Expérience B

On utilise le même matériel que pour l'expérience A. Mais on dispose dans le tuyau un cache entre le fil central et la marque bleue (qui restent visibles). Le sujet dispose donc de la position initiale du crayon (sur le fil) et de sa position finale (sur la marque bleue). A l'observation continue du mouvement de l'expérience A, se substituent donc des données "stroboscopées".

On dit au sujet qu'entre les deux positions perçues (initiale et finale), les mouvements du crayon et du fauteuil ne peuvent être modifiés (vitesses constantes) ; on précise que tous les mouvements s'arrêtent lorsque le crayon apparaît sur la marque bleue, ce qui a pour effet de figer la position finale.

On présente à l'enfant le mouvement du crayon (fauteuil fixe) ; on demande alors, comme pour l'expérience A :

"Comment se déplace le crayon dans le tuyau ?"

"Comment se déplace le crayon dans la pièce ?"

"Comment se déplace le fauteuil dans la pièce ?".

Mais on ajoute ceci :

"Qui est le plus près de la fenêtre, à la fin, le crayon ou le fauteuil ?"

afin de favoriser la prise en compte par le sujet des positions finales relatives qui sont, rappelons-le, invariantes. Cette présentation est

répétée avant chaque partie de l'expérience, tout comme pour l'expérience A. Les questions posées sur les compatibilités des sens O₁ et O₂ deviennent :

"Est-ce possible qu'à la fin (quand le crayon est sur le bleu, le crayon soit plus près de la fenêtre que toi, si... ?".

On a également eu recours, ici, à quelques démonstrations. Celles-ci sont toujours analysées en termes de positions relatives finales dans la pièce.

Expérience C

Le tuyau est celui de l'expérience A : sans cache. Le mouvement observé est donc le mouvement continu du crayon, à partir du milieu du tuyau jusqu'à la marque bleue. Mais, ici, le crayon est déplacé par le sujet lui-même.

On commence par montrer le mouvement du crayon dans le tuyau. Puis on dit au sujet de faire lui-même le geste pour voir ce mouvement dans le tuyau.

Pour la partie I, où le crayon est fixe au sol, on spécifie à l'enfant que l'on tient son bras immobile de manière à garder le crayon dans la même position dans la pièce. Lors de démonstrations éventuelles, on lui fait alors remarquer l'extension de son bras quand le fauteuil est déplacé. Les questions posées sont les mêmes que dans l'expérience A.

Pour les parties II et III, le sujet doit faire lui-même le geste pour voir le crayon aller du milieu à la marque bleue du tuyau, ce qui ne pose aucun problème. II_s et III_s viennent ensuite sous la forme suivante :

"Si la personne qui prend des notes (observateur extérieur fixe dans la pièce) regarde le crayon, peut-elle le voir se déplacer vers la fenêtre (respectivement la porte), lorsque tu vois le crayon aller vers le bleu et lorsque, en même temps, on pousse ton fauteuil vers la fenêtre (respectivement la porte) ?".

De même, pour les questions II_V et III_V :

"Si la personne regarde le crayon et le fauteuil, est-ce qu'elle les voit se déplacer à la même vitesse ou bien est-ce que l'un va plus vite que l'autre, si oui, lequel ?".

Mise à part cette modification des questions, le déroulement du questionnaire est le même qu'en A et B avec les éventuelles démonstrations.

3. Population interrogée

Les sujets interrogés sont des enfants du cours moyen 2, d'une école primaire du 13^{ème} arrondissement* dont l'âge moyen est de 11 ans. Ils appartiennent à 3 classes parallèles de même niveau. Nous les avons répartis au hasard en trois groupes pour les expériences A, B et C.

72 enfants ont subi l'expérience :

Expérience A, parties I et II : N = 15, partie III : N = 28**.

Expérience B : N = 22.

Expérience C : N = 22.

4. Résultats

Avant de faire cette expérience avec des enfants de cours moyen 2, nous avons interrogé, dans le but de mettre au point notre protocole, des enfants d'âge très divers du centre aéré des Universités Paris VI et VII.

* Nous remercions M. le Directeur et les instituteurs de CM2 de l'école de la rue du Château des Rentiers (Paris 13^{ème}) de leur aimable accueil.

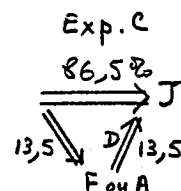
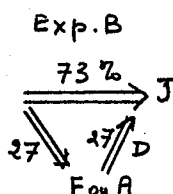
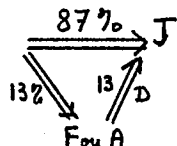
** Lors d'un sondage préalable, nous avons constaté, pour l'expérience A, une plus grande facilité à répondre correctement à la question II_V qu'à la question III_V. Nous avons voulu vérifier si cette facilité n'était pas due simplement à l'ordre dans lequel étaient posées les questions : II_V puis III_V. Pour cela, nous avons posé à un groupe de 13 sujets la question III_V seule. Les résultats étant analogues à ceux du groupe qui a subi l'expérience en entier, nous les avons regroupés.

Avec les enfants de 5-6 ans, nous n'avons pas réussi à dépasser la partie I. En effet, les enfants ne pouvaient penser un seul instant qu'ils verraient encore, dans leur tuyau, le crayon aller du milieu du tuyau vers le bleu lorsque celui-ci était fixe dans la pièce : ou bien le crayon est fixe et il ne peut pas se déplacer ou bien il se déplace et ne peut être fixe. Le comportement de ces enfants est semblable à celui que Piaget et ses collaborateurs ont observé.

Après cette enquête préliminaire, nous avons décidé d'interroger des enfants de même niveau scolaire et de même âge moyen : notre souci n'était pas de faire une enquête génétique, mais d'étudier la notion de mouvement à partir des changements de référentiels : pour cela, les enfants devaient avoir au moins 11 ans.

a) Résultats de la partie I

Tous les enfants et ceci quelle que soit l'expérience (A, B ou C) répondent correctement à la partie I (crayon fixe dans la pièce). Exp. A



J = réponse juste ; F ou A = réponse fausse ou absente
D = intervention d'une démonstration.

Les enfants réagissent comme les adultes en attribuant le mouvement de l'objet au déplacement de l'observateur.

b) Comparaison des expériences C et A

1 - Association mouvement-moteur.

L'expérience C révèle l'importance du mouvement propre, c'est-à-dire celui communiqué par le moteur propre.

En effet, presque tous les enfants pensent que la situation II est possible ; mais quand il s'agit de savoir qui, dans la pièce, va

le plus vite (crayon ou fauteuil), un certain nombre répond :

"Cela dépend de mon geste".

"Le crayon va plus vite car mon geste est plus rapide".

"Ce serait une coïncidence d'aller à la même vitesse".

Ces réponses sont aisément interprétables si l'on admet que l'enfant traduit "vitesse du crayon dans la pièce" par "vitesse de son geste" ou "vitesse du crayon par rapport à lui-même", c'est-à-dire la vitesse propre du crayon. L'allusion à l'observateur extérieur "la personne qui prend des notes" ne sert à rien. La raison en est sans doute que cette précaution oratoire correspond à une question que l'enfant ne se pose pas : "la vitesse du crayon, dans quel référentiel ?". Pour l'enfant, la vitesse du crayon, c'est la vitesse du moteur propre sans plus.

Nous n'avons pas rencontré des difficultés à la partie II de l'expérience A : les enfants comparent sans problème les vitesses du crayon et du fauteuil dans la pièce, les supports des moteurs étant dans ce référentiel.

A la partie III (les mouvements du crayon sont en sens contraire dans les deux référentiels), 86 % des enfants de l'expérience C (contre 32 % à l'expérience A) déclarent impossible la situation III, car :

"Le crayon ne peut à la fois aller par là (→) et par là (←)".

Que le nombre de refus soit plus élevé dans une expérience que dans l'autre, n'est pas surprenant : en effet dans l'expérience C le mouvement propre du crayon est également le mouvement observé : il n'en est que plus intrinsèque. En revanche, dans l'expérience A, le mouvement propre n'est pas le mouvement observé : il peut y avoir compatibilité entre ces deux mouvements.

2 - Conséquences de cette association mouvement-moteur.

Les enfants (86 %) de l'expérience C qui déclarent, tout d'abord, la situation III impossible, modifient tous leur réponse après une démonstration et la justifient: par exemple :

"Si vous poussez le fauteuil, je suis entraîné, le crayon aussi ; mais il ira moins vite que moi".

Avec l'expérience A, 22 % des enfants maintiennent leur réponse initiale : certains nous accusent d'avoir triché durant les nombreuses démonstrations réalisées (nous avions soi-disant arrêté le crayon à un moment donné). Rappelons qu'après chaque démonstration, on fait constater à l'enfant la position finale du crayon dans la pièce. Cette différence de comportement nous semble découler de cette association puissante mouvement-moteur.

Avec l'expérience C, le mouvement observé et le mouvement propre sont les mêmes, il suffit d'expliquer, après démonstration, la position finale du crayon. Pour cela, les sujets additionnent algébriquement les déplacements associés à chacun des moteurs, tout comme pour l'escargot sur sa planchette.

Avec l'expérience A, le crayon n'est plus entraîné puisque c'est l'expérimentateur qui le déplace : les deux mouvements propres sont donc dynamiquement indépendants. Pour expliquer la position finale du crayon dans la pièce, il faut, tout d'abord, expliquer le mouvement observé qui est de sens contraire à celui du mouvement propre, opération très différente de la précédente à cause de l'absence d'entraînement.

Enfin, lorsque les enfants de ces deux expériences déclarent, à un moment donné, la situation III possible, ils ne réagissent pas de la même façon lorsqu'ils doivent dire qui du fauteuil ou du crayon va le plus vite dans la pièce. Ceux de l'expérience A répondent sans problème à cette question puisqu'ils comparent les vitesses des deux moteurs, chacune étant en fait définie dans le référentiel de la pièce. Certains, de l'expérience C, ne considèrent à nouveau que la vitesse de leur geste et ne comprennent pas la question, l'allusion à l'observateur extérieur, etc.

c) Comparaison des expériences B et A

Lors de l'expérience B, le sujet n'observe plus le mouvement continu du crayon car il n'a accès qu'aux positions relatives initiale

et finale du crayon et du tuyau, le cache évacuant complètement le déroulement continu du mouvement pour n'en conserver que deux informations successives instantanées. Ces données des positions relatives permettent, en principe, de reconstituer le mouvement, c'est-à-dire son sens et éventuellement sa vitesse ; or, le comportement des enfants n'est pas le même dans les expériences A et B.

Les nombreux refus des enfants (32 %) à admettre la situation III, dans l'expérience A, ne se retrouvent plus dans l'expérience B où seulement 4 enfants sur 22 déclarent cette situation impossible. Cependant il suffit de répéter verbalement la consigne pour que trois d'entre eux modifient tout de suite leur réponse initiale (le quatrième modifiera aussi sa réponse mais ce sera plus long) et nous expliquent que "le crayon doit aller moins vite que le fauteuil puisqu'il doit rester derrière moi". Ceci ne se produit jamais dans l'expérience A.

Une donnée de type géométrique (les positions relatives de deux objets à un instant donné) est spontanément considérée comme une donnée intrinsèque et donc, dirait le physicien, invariante par changements de référentiels. Il se trouve que cette donnée est bien un invariant galiléen alors que le sens d'un mouvement (exp. A) ne l'est pas.

d) Conclusion

Nous retrouvons donc chez l'enfant les deux principales caractéristiques du modèle naturel :

- l'une découle de la relation mouvement-moteur, qui empêche l'établissement d'une relation entre un point de vue purement descriptif, la cinématique, et un point de vue causal, la dynamique,
- l'autre découle d'une élimination du temps qui conduit à décrire tout mouvement dans un espace unique et intemporel.

Les résultats des expériences réalisées par l'Ecole de Genève ne sont nullement contradictoires avec le modèle naturel : bien au contraire, les commentaires vont tous dans le même sens et font intervenir les deux aspects du modèle naturel.

Nous voudrions citer, enfin, un résultat important relevé par Piaget lors de l'étude de l'évolution des images mentales chez l'enfant. S'appuyant sur les nombreuses expériences décrites, il arrive à la conclusion suivante :

"Non seulement le dessin ne peut figurer le mouvement que par une suite de positions immobiles, si claire que puisse être le symbolisme des positions indiquées, mais encore l'image mentale elle-même ne parvient guère à mieux. Que l'on essaie par exemple d'imaginer le mouvement des jambes d'un cycliste, on parvient certes à visualiser de petits déplacements d'un pied qui s'abaisse ou qui remonte, etc... mais dès que l'on croit savoir la continuité, on s'aperçoit qu'on a prolongé l'image par la pensée et qu'on ne "voit" plus réellement l'ensemble du mouvement²³". (p. 428)

Puis, plus loin :

"...l'image en assurant une plus fine analyse des "états" et en facilitant même l'anticipation figurales des transformations, malgré le caractère statique irréductible de cette figuration, constitue un auxiliaire indispensable au fonctionnement de la pensée en son dynamisme même". (p. 458).

Ce résultat nous paraît important car il indique, comme le remarque A. Koyré, "qu'il est plus facile - plus naturel - d'imaginer dans l'espace que dans le temps"⁷.

Les mouvements décrits dans le modèle naturel sont généralement obtenus en essayant de "se mettre à la place de l'observateur" et d'imaginer ce que voit celui-ci: cela nécessite de se représenter à l'aide d'images le mouvement observé. Le caractère géométrique et intemporel de l'espace unique de description n'est nullement contradictoire avec le caractère statique irréductible des images.

Très tôt, donc, s'installe un système qui se stabilise dès l'adolescence, et qui se renforce ensuite d'autant plus facilement que l'enseignement ne se préoccupe guère de le transformer, comme nous allons le voir dans la partie VI.

V. LE MODELE NATUREL ET L'HISTOIRE

INTRODUCTION

A la lecture des paragraphes précédents, il est tentant de mettre en parallèle le modèle naturel et les différents modèles historiques. Cependant si nous avons soigneusement évité, jusqu'ici, de nous référer à l'histoire, c'est tout simplement parce qu'un parallélisme strict est dénué de sens.

En effet, l'homme du XXème siècle ne vit ni dans l'antiquité, ni au moyen-âge : grâce aux revues de vulgarisation, la presse, la radio et la télévision, il est informé des exploits techniques réalisés (voyage sur la lune par exemple), et dans une certaine mesure, des grandes découvertes scientifiques. Ainsi, il ne viendrait à l'idée de personne de remettre en question le fait que "la Terre tourne autour du soleil, tout en tournant sur elle-même".

Par ailleurs, de nombreux siècles se sont écoulés avant que ne s'instaure un modèle mathématisé de la physique. Contrairement à nos étudiants, nos ancêtres cherchaient à construire un système cohérent permettant d'expliquer les observations quotidiennes. Cela les a conduit à définir de façon plus précise les concepts utilisés par leurs prédécesseurs. Or, aujourd'hui, tous les concepts de la cinématique classique sont clairement définis : nous n'avons plus à les inventer mais seulement à les comprendre et les assimiler.

Si un parallélisme strict n'a aucun sens, on peut cependant trouver dans l'histoire un certain nombre de faits qui montrent que les obstacles sur lesquels butent les étudiants pour arriver à une compréhension des concepts de cinématique sont parfois de même nature que ceux sur lesquels nos ancêtres ont buté pour arriver à

définir ces concepts. Ce type de comparaison permettra non seulement de mieux comprendre les difficultés rencontrées actuellement par les élèves mais aussi de réaliser que certaines notions ne sont pas aussi simples qu'on le dit ou le croit.

Il ne s'agit pas de retracer ici, même à grands traits, l'histoire de la mécanique car cela nous amènerait à aborder tous les aspects philosophiques, cosmologiques et théologiques de la question. Deux points nous paraissent intéressants :

- Le premier concerne la notion familière au modèle naturel, c'est-à-dire celle de mouvement réel ou privilégié. Or, comme le dit M. Campbell, "la présence du mot réel est toujours le signe d'un danger de confusion de pensée". En effet, admettre qu'il existe des mouvements privilégiés, que l'on peut connaître "réellement" ou "physiquement" est contraire au principe de relativité (même restreinte).

- Le second consiste à étudier les étapes importantes qui ont permis aux physiciens de différencier la cinématique de la dynamique et d'abandonner la notion de mouvement réel.

A. LE MOUVEMENT "REEL" AU COURS DES AGES

Il n'est pas vain de rappeler que l'histoire de la mécanique a été marquée par l'idée qu'il existe physiquement des mouvements réels (propres, absolus, vrais, naturels...) ; cette réalité - et donc ce privilège - étant intimement liée à leur cause motrice.

Rappelons pour mémoire que, jusqu'à la fin du moyen-âge, tout mouvement était défini par sa cause motrice. Aristote distinguait deux types de mouvements - les mouvements "naturels" mus par le premier moteur et les mouvements "violents" mus par un moteur externe à l'objet. Cette distinction tend à disparaître au moyen-âge au profit du seul mouvement naturel, défini par un moteur unique, interne à

l'objet, appelé "impetus", "vis impressa", etc.

Cette notion de mouvement privilégié - dont le nom change au cours des années - persiste encore sous Galilée, Newton et ses successeurs.

Si Galilée* révolutionne les idées scientifiques de son époque, c'est parce qu'il fut le premier à étudier le mouvement en tant que tel, en refusant d'en chercher les causes. En principe, "le privilège du mouvement naturel a complètement disparu. Le mouvement se conserve désormais non plus parce qu'il est naturel mais tout simplement parce qu'il est mouvement" (A. Koyré⁷, p. 238). En principe, car, comme le fait remarquer Koyré, "le résultat auquel aboutit l'analyse galiléenne, c'est la persistance naturelle ou plus exactement la situation privilégiée du mouvement circulaire" (A. Koyré⁷, p. 206).

Alors que Newton** arrive à faire une synthèse du principe d'inertie, de la "relativité galiléenne", des lois de Kepler..., il est surprenant de trouver sous sa plume des notions qui ont été durant tout le moyen-âge et la renaissance des obstacles. En effet, on lit²⁵ :

"Le repos et le mouvement relatif et absolu sont distingués par leurs propriétés, leurs causes, leurs effets".

"Les causes par lesquelles on peut distinguer le mouvement vrai du mouvement relatif sont les forces imprimées dans le corps pour leur donner le mouvement : car le mouvement vrai d'un corps ne peut être produit ni changé que par des forces imprimées à ce corps même ; au lieu que son mouvement relatif peut être produit et changé sans qu'il éprouve l'action d'aucune force..."

Ce type de phrase pourrait sans problème être utilisée par nos étudiants. Qu'y a-t-il de commun cependant ? Pour les étudiants, un mouvement réel est déterminé dynamiquement ; Newton sépare clairement la cinématique de la dynamique mais pense qu'il existe un espace absolu

* Galilée (1546-1642)

** Newton (1642-1727).

dans lequel existent les vrais mouvements. En effet, "Newton pense que dynamiquement et non cinématiquement, l'espace absolu peut être déterminé par l'existence de forces centrifuges dans un mouvement de rotation. Bien que Newton ne puisse explicitement en déduire que les forces centrifuges détermineraient le mouvement absolu, il est clair que ceci était son intention. L'espace de Newton semble avoir une double structure, absolu pour les mouvements accélérés et relatif pour les translations uniformes" (M. Jammer)²⁶.

Leibniz (1646-1716) et Huighens (1629-1695) étaient en complet désaccord avec Newton sur ce point. Leibniz écrit à Huyghens en 1694²⁷ :

... Comme je vous disois un jour à Paris qu'on avoit de la peine à connoistre le veritable sujet du Mouuement vous me répondites que cela se pouuoit par le moyen du mouuement circulaire, cela m'arresta; et je m'en souuins en lisant à peu près la même chose dans le liure de Mons. Newton; mais ce fut lorsque je croyois déjà voir que le mouuement circulaire n'a point de privilege en cela. Et je voy que vous estes dans le meme sentiment. Je tiens donc que toutes les hypotheses sont equivalentes et lorsque j'assigne certains mouuements à certains corps, je n'en ay ny puis avoir d'autre raison, que la simplicité de l'Hypotheses croyant qu'on peut tenir la plus simple (tout considéré) pour la veritable. Ainsi n'en ayant point d'autre marque, je crois que la difference entre nous, n'est que dans la maniere de parler, que je tache d'accomoder a l'usage commun, autant que je puis, salva veritate. Je ne suis pas même fort elogne de la vostre, et dans un petit papier que je communiquay à Mr. Viviani, et qui me paroissoit propre à persuader Messieurs de Rome a permettre l'opinion de Copernic, je m'en accommodois. Cependant si vous estes dans ces sentimens sur la realité du mouuement, je m'imagine que vous deuriés en avoir sur la nature du corps de differens de ceux qu'on a coustume d'avoir. J'en ay d'assez singuliers et qui me paroissent démontrés.⁵⁴

Personne, à notre connaissance, n'a trouvé jusqu'à présent trace de la solution de Leibniz. Quant à celle de Huyghens, elle ne fut pas publiée mais retrouvée en 1920 par D.J. Korteweg et J.A. Schouten dans les archives de Leyde. Ce texte (cité en annexe), bien que critiquable, affirme cependant : "It is therefore impossible to state that a body is at rest in infinite space, or that it moves therein; rest and motion are therefore only relative"²⁸.

Euler (1707-1783), en revanche, tente de démontrer la réalité de l'espace absolu dans "Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum" en s'appuyant sur la loi d'inertie, celle-ci, d'après lui, étant une preuve de l'existence d'un tel espace. Euler ne fut pas le seul à penser ainsi : Maclaurin (1698-1746) écrit dans "Account of Sir Isaac Newton philosophical discoveries" : "This perseverance of

a body in a state of rest or uniform motion, can only take place with relation to absolute space, and can only be intelligible by admitting it"²⁹.

Afin d'illustrer la façon dont la mécanique de Newton était comprise au XVIII^{ème} siècle, nous donnons en annexe des extraits du Dictionnaire Raisonné de toutes les parties de la Physique (tome II) de M. Bresson, publié en 1790³⁰. Le lecteur sera peut-être surpris d'y trouver bon nombre de caractéristiques du modèle naturel.

Les physiciens, n'arrivant pas à démontrer l'existence d'un tel espace à l'aide de la seule mécanique, réalisèrent de nombreuses expériences sur la propagation de la lumière dans les milieux réfringents et sur l'électrodynamique des corps en mouvement avec l'intention de mettre en évidence tout mouvement relatif par rapport à un éther immobile et absolu. On connaît les résultats négatifs de ces efforts. Il a fallu attendre 1885 pour que L. Lange remplace la notion d'espace absolu par celle de système inertiel : il y a à peine un siècle !

Retenons de ce qui précède que la notion de mouvement réel - au sens mouvement privilégié - a marqué toute l'histoire. Au départ, les physiciens se sont intéressés aux seuls mouvements "naturels", définis dynamiquement. Lorsque cinématique et dynamique ont été séparées, la plupart des physiciens ont cherché à démontrer l'existence d'un espace - l'éther - où des mouvements réels ou absolus seraient définis. Ce souci constant de démontrer l'existence d'une telle notion permet de comprendre pourquoi celle-ci est si "naturelle" chez les étudiants.

B. NATURE DES OBSTACLES RENCONTRES

Pour arriver à une véritable relativité du mouvement, il a été nécessaire d'introduire un certain nombre de notions comme celles d'observateur, de système mécanique, de système inertiel et les principes d'inertie et de relativité. Nous allons voir ici comment elles ont été

introduites, certaines étant par la suite rejetées pour être reprises un peu plus tard : c'est cette succession de pas en avant et en arrière qui illustre la nature des obstacles rencontrés.

Jusqu'au moyen-âge, le système dominant toute la pensée scientifique est celui d'Aristote. Introduisait-il la notion d'observateur, de mouvement relatif ? Citons à ce sujet Mme Tonnelat²⁴ :

"La physique d'Aristote se présente comme une entreprise beaucoup trop structurée pour ne pas avoir aperçu, comme on le croit trop souvent, que tout mouvement local devait être à la fois relatif et absolu. Il est relatif parce que la retranscription d'un mouvement quelconque dans l'expérience d'un autre observateur procède d'une comparaison et n'a aucun sens intrinsèque. Il est absolu parce que cet indéniable relativisme de fait n'atteint pas l'essence du mouvement qui est altération et changement".

Mais, comme le fait remarquer cet auteur :

"Le corollaire de mouvement absolu est la notion d'observateur absolument immobile. Aristote ne se souciait pas d'incarner cet observateur dans un ensemble expérimental. Les difficultés de la physique du moyen-âge consistèrent au contraire à rattacher le caractère absolu de l'immobilité et du mouvement à un contexte expérimental et imaginé".

Si Aristote n'a pas besoin d'observateur (au sens actuel du terme), c'est en partie parce qu'il avait posé comme principe l'immobilité de la terre (immobilité justifiée par les observations réalisées à son époque). Cependant remettre en cause l'un des supports du système aristotélicien ne suffit nullement à instaurer un nouveau système susceptible de remplacer le précédent. Commencèrent alors les célèbres discussions sur le problème de la pierre tombant d'un mât d'un navire et sur celui des boulets de canon tirés vers l'ouest ou vers l'est.

Mais avant de répondre au problème de la pierre lâchée du haut d'un mât, il fallait expliquer pourquoi, si la terre est mobile, une pierre lancée verticalement retombe dans les mains du lanceur.

Bruno (1548-1600) tente de répondre à cette question en faisant une analogie avec ce qui se passe sur un navire, le mouvement global du navire ne produisant aucun effet sur les mouvements partiels se passant dans le navire

"... car il y a une différence entre le mouvement du navire et le mouvement des choses qui sont dans le navire ; et si cela n'était pas vrai, il s'ensuivrait que, lorsque le navire court sur la mer, personne ne pourrait jamais lancer quelque chose, en ligne droite, d'un bord à l'autre ; et qu'il serait impossible à quiconque de pouvoir faire un saut et de retomber des pieds à l'endroit dont il s'était enlevé"³¹.

Poursuivant l'analogie, il en déduit que "toutes les choses qui se trouvent sur la terre se meuvent avec la terre" et donc que le mouvement global de la terre ne produit aucun effet sur les mouvements partiels. Par ailleurs, avec la même argumentation, il en déduit que la pierre lâchée d'un mât d'un navire tombe au pied du mât, que le navire soit immobile ou en mouvement.

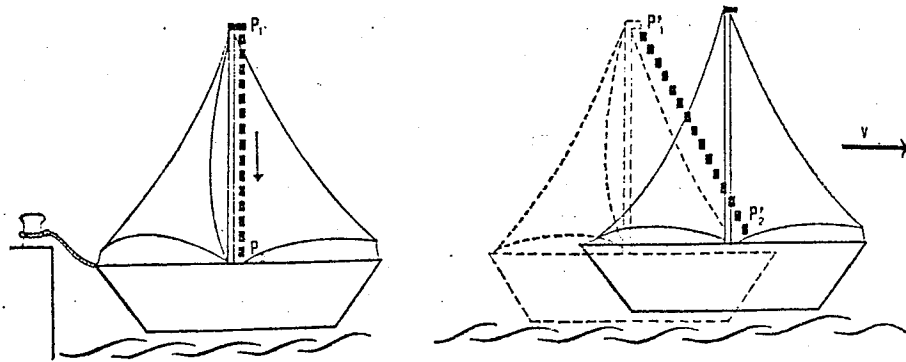


FIG. 7. — La pierre tombant du haut du mât aboutit au pied de celui-ci quel que soit le mouvement du bateau par rapport à la rive.
« Toutes les choses qui se trouvent sur la terre se meuvent avec la terre. La pierre jetée de la hune reviendra en bas de quelque façon que le navire se meuve. »

Giordano BRUNO (*La Cena de le Ceneri*).

Bruno définit ainsi la notion de système mécanique, système formé par un ensemble de corps liés non par une même nature mais par leur participation à un mouvement commun. Il montre ainsi qu'il est impossible de mettre en évidence le mouvement d'un système mécanique par des expériences réalisées à bord de celui-ci, et ouvre la porte à une "science nouvelle" qu'il n'arrive cependant pas à fonder car reste attaché à la notion d'impetus et à un animisme profond.

« Or donc, nous dit-il, que l'on s'imagine deux hommes : l'un dans le navire qui court, et l'autre en dehors de celui-ci : que l'un et l'autre aient la main dans le même point de l'air, et que de ce même lieu, en même temps, l'un laisse tomber une pierre, et l'autre une autre, sans leur donner aucune poussée : la pierre du premier, sans perdre un point, ni dévier de sa ligne (verticale) viendra au lieu fixé d'avance ; et celle du second se trouvera transportée en arrière. Ce qui ne provient de rien d'autre que de ce que la pierre qui part de la main de celui qui est porté par le navire, et par conséquent se meut selon le mouvement de celui-ci, possède une certaine vertu impressée, que ne possède pas l'autre, celle qui vient de la main de celui qui est en dehors du navire ; et cela bien que les (deux) pierres aient la même gravité et que, si elles partent, — autant que faire se peut —, du même point et ont subi la même poussée, elles aient le même air à traverser. De cette diversité nous ne pourrions donner aucune raison sinon celle que les choses, qui sont rattachées au navire par un lien ou par une telle appartenance, se meuvent avec celui-ci ; et que l'une des pierres, celle qui se meut avec le navire, porte avec elle la vertu du moteur, tandis que l'autre n'y a pas participation. D'où l'on voit très clairement que (la pierre) ne reçoit la vertu d'aller en droite ligne ni du point dont elle part, ni du point où elle va, mais de l'efficacité de la vertu qui lui fut imprimée. Et c'est de cela que provient toute la différence. Ce qui me paraît suffisant pour répondre à l'argument précité. »

Ainsi que le font remarquer A. Koyré et Mme Tonnelat, cette argumentation basée sur l'impetus, ne peut fonder le principe d'inertie.

Les arguments de Bruno sont alors attaqués sur deux fronts :

- Le premier (commenté par T. Brahé) concerne l'impossibilité de combiner plusieurs mouvements sans qu'ils ne se gênent. Abordant le problème du boulet de canon, T. Brâhé écrit³⁴ :

En effet, selon Copernic et Bruno (2), « dans le boulet tiré, il y aurait trois mouvements : l'un par lequel celui-ci, en raison de sa gravité, tend en ligne droite vers le centre de la terre, un autre par lequel, en vertu de sa communauté de nature avec la terre il imiterait, sans se lasser, la rotation de celle-ci, et encore un troisième produit... par la violence de... l'explosion de la poudre... violence qui force le boulet à aller d'un élan très rapide là où, selon sa propre nature, il ne veut aucunement aller. Or ce mouvement, extrêmement violent, gêne l'autre, à savoir celui par lequel les graves, nécessairement et naturellement, descendent en ligne droite ; aussi c'est seulement après avoir franchi un grand espace, et même seulement après que ladite violence s'épuise et revient petit à petit au repos, que (ledit boulet) peut toucher terre : je demande donc quel sera l'effet de ce second mouvement (à savoir de la rotation en cercle)... et comment il se fait qu'il ne soit absolument pas gêné par cette concitation très violente faite contre la Nature ? Car l'expérience nous montre que l'obus de même grandeur et poids, lancé dans l'un et dans l'autre sens par une même quantité de poudre de canon de même force, franchit à peu près le même espace de la surface terrestre,

autant vers l'Orient que vers l'Occident, s'il est, comme je l'ai dit, tiré avec la même inclinaison du canon, et pourvu que l'air soit assez tranquille et qu'il n'y ait pas de cause accidentelle favorisant ou empêchant cette impulsion ; or, cependant, par suite du mouvement diurne extrêmement rapide de la terre (s'il y en avait un), l'obus tiré vers l'Orient ne pourrait jamais franchir autant d'espace sur la surface de la terre, la terre de son mouvement (propre) venant au-devant de lui, que celui qui de la même manière serait lancé vers l'Occident... »

Admettre la coexistence d'un mouvement violent avec le mouvement naturel de la terre sans que l'un ne gêne l'autre reviendrait pour T. Brahé, à admettre une cause qui ne produise aucun effet.

- Le second (commenté par Kepler) concerne la notion de système mécanique. Pour Kepler, deux mouvements ne se gênent pas mais chacun d'eux doit avoir une cause motrice. Ainsi, une pierre lancée en l'air suit la terre parce que celle-ci l'attire :

"... la terre, entre temps s'en va mais encore avec elle, les chaînes magnétiques et invisibles par lesquelles la pierre est rattachée aux parties sous-jacentes et avoisinantes de la terre et par lesquelles elle est tirée vers la terre par la voie la plus courte, c'est-à-dire la perpendiculaire"³⁵.

Il lui faut donc une cause - une force physique réelle - pour vaincre l'inertie de la pierre (ici inertie signifie résistance au mouvement et non résistance à la mise en mouvement). Or cette inertie est négligeable devant la force des chaînes magnétiques :

« Écoute maintenant la solution. Il est vrai que si la pierre était éloignée de la terre d'une distance notable, il en serait ainsi. Mais voilà : il y a 860 milles du centre (de la terre) à sa surface : or, en vérité, aucun oiseau ne vole tellement haut qu'il soit distant de la terre d'un demi-mille : car, certes, il n'est pas plus capable de voler dans l'éther, que nous dans l'air, ou que la pierre n'est capable de nager dans l'eau. » Kepler en conclut que le retard dû à la résistance de la pierre au mouvement (1) d'entraînement sera minime et pratiquement imperceptible.]

Kepler n'admet pas le point de vue purement mécanique de Bruno : un système mécanique n'existe pas, seul existe un système physique, c'est-à-dire un système de liens ou liaisons réelles. Aussi Bruno a tort car :

"Les mouvements des corps ne sont pas affectés par le mouvement de la terre, comme le sont les projections des corps par suite du mouvement du navire ; car ils ne tendent vers aucune région de l'éther, mais sont seulement attirés par le plan sous-jacent de la terre au moyen de chaînes magnétiques"³⁷.

Bien que ces trois illustres personnages soient arrivés à des résultats différents, ces exemples montrent qu'un des plus gros obstacles de la cinématique est cette notion de mouvement réel, lié à sa cause motrice. On notera enfin que l'on trouve chez les étudiants ces mêmes difficultés dès qu'un objet entraîné n'a plus aucun contact avec le support entraîneur.

Galilée réussit avec beaucoup de difficultés à mettre ses contemporains d'accord. Dans ses dialogues, il part du principe que toute expérience interne imaginée pour mettre en évidence le mouvement du système lui-même aboutira à un échec³⁸ :

« Posons donc en principe de notre investigation que, quel que soit le mouvement que l'on attribue à la terre, il est nécessaire que pour nous, qui sommes habitants d'icelle et par conséquent participant de celui-là, il reste totalement imperceptible et comme n'étant pas, tant que nous envisageons uniquement les choses terrestres ; mais, au contraire, il est tout autant nécessaire que le même mouvement soit commun à tous les autres corps et objets visibles qui, étant séparés de la terre, en sont privés. De telle façon que la vraie manière de rechercher si un mouvement quelconque peut être attribué à la terre et, le cas échéant, lequel, est de considérer et d'observer si dans les corps séparés de la terre se laisse observer une apparence de mouvement qui convient également à tous ».

Puis il reprend le problème de la pierre tombant au pied du mât d'un navire.

Salviati (3). « Vous dites : puisque, lorsque le navire est immobile, la pierre tombe au pied du mât, et lorsqu'il se meut, elle tombe loin du pied ; inversement, du fait que la pierre tombe au pied du mât on infère que le navire est immobile, et du fait qu'elle en tombe loin, il s'ensuit que le navire est en mouvement ; et ainsi, de la chute de la pierre près du pied de la tour s'infère l'immobilité de la terre. N'est-ce pas là votre raisonnement ? » Et *Simplicio* acquiesçant, *Salviati* poursuit. « Or, dites-moi, si la pierre, lâchée du haut du mât lorsque le navire marche à une grande vitesse, tombait précisément au même point du navire où elle tombe lorsque le navire était immobile, de quel service cette chute vous serait-elle pour vous assurer si le navire est immobile ou en marche ? » — *Simplicio* : « Absolument d'aucun. » †

Plusieurs pages plus loin, Salviati poursuit :

par conséquent, un navire qui se mouvra sur cette surface, avec une impulsion une fois conférée, se mouvra uniformément et éternellement. La pierre, qui est sur le sommet du mât de ce navire, ne se meut-elle pas aussi, portée par celui-ci, sur la circonférence d'un cercle et, par conséquent, d'un *mouvement qui est indélébile en elle* (3) tant que les obstacles extérieurs sont écartés ? Et ce mouvement n'est-il pas d'une vitesse égale à celle du navire ? »

Simplicio pense alors que si la balle lâchée du haut d'un mât tombe toujours au pied du mât :

, il s'ensuivrait que, si quelqu'un, lancé sur un cheval en course rapide, laissait tomber de ses mains une balle, celle-ci, tombée à terre, devrait semblablement continuer son mouvement et suivre la course du cheval sans demeurer en retard ; or un tel effet, je ne crois pas qu'on le puisse voir, à moins que le cavalier ne jette cette balle dans la direction de sa course ; car, sans cela, je crois qu'elle restera à terre là où elle la touchera. »

Salviati répond :

— : « Lorsque vous la lancez avec le bras, que reste-t-il d'autre dans la balle, issue de la main, que le *mouvement* (5) engendré par votre bras, lequel, conservé en elle, continue à la conduire plus loin ? Or, il n'importe guère que cet *impetus* soit conféré à la balle davantage par votre bras que par le cheval ; votre main, et par conséquent la balle, ne court-elle pas aussi vite que le cheval lui-même ? »

Galilée (par la bouche de Salviati) étudie donc le mouvement en lui-même et non plus à partir de ses causes motrices ; il se refuse aussi à décomposer un mouvement en plusieurs mouvements qui pourraient se gêner. Par ailleurs, le terme d'*impetus* devient souvent synonyme de mouvement et non plus de force causant le mouvement. Dans la suite des Dialogues, ce terme disparaît complètement pour être remplacé par ceux de mouvement et de vitesse.

Salviati :

Ainsi donc, lorsque la main est seulement ouverte, la balle en part avec un *mouvement* (1) déjà engendré non pas par votre bras, au moyen de votre mouvement particulier, mais par le *mouvement* (1) dépendant de celui du cheval, qui arrive à être communiqué à vous, au bras, à la main, et, finalement, à la balle. Aussi vous dirai-je en plus que si (pendant qu'il court), le cavalier, avec son bras jetait la dite balle dans la direction opposée à celle de sa course, celle-ci, arrivée à terre, et bien qu'elle eût été jetée dans la direction

opposée, tantôt suivra la course du cheval, et tantôt restera immobile, et ne se mouvra dans la direction opposée à celle de la course que si le mouvement (1) qu'elle aura reçu du bras possède une vitesse supérieure (1) à celle de la course. Et ce que certains disent, à savoir que le cavalier pourrait jeter une lance en l'air dans la direction de sa course, la suivre à cheval et, finalement, la rattraper, est une sottise, car, pour que le projectile vous retombe dans les mains, il faut le lancer en haut, de la même manière que si l'on était immobile... » ce qui, désormais, va de soi, vu que la flèche, ou tout autre

Galilée définit "une relativité physique, c'est-à-dire une équivalence des observateurs en ce qui concerne les expériences réalisées dans leur système propre" (Mme Tonnelat)²⁴ ; mais il lui manque le principe d'inertie pour restreindre cette équivalence à des observateurs en mouvement rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres. En fait, Galilée sait fort bien qu'un mouvement rectiligne et uniforme pouvait continuer indéfiniment mais il affirme par ailleurs que ce mouvement ne peut pas être "naturel" car "il est impossible qu'un mobile quelconque ait, par nature, le principe de se mouvoir en ligne droite, c'est-à-dire vers où il est impossible d'arriver puisqu'il n'y a pas de terme dans l'infini"³⁹. Bien que son refus d'admettre la conservation du mouvement rectiligne soit lié à des considérations cosmologiques, il pense aussi :

qu'un tel mouvement rectiligne des *graves* est une chose impossible, et que — pour Galilée — des corps non-graves cesseraient d'être des corps et ne pourraient se mouvoir du tout (1).

1. *Dialogo*, II, p. 193 : « Sagredo. Ma io, Sig. Salvati vo pur ora considerando un'altra cosa mirabile : e questa è, che stanti queste considerazioni, il moto retto vadia del tutto a monte e che la natura mai non se ne serva, poichè anco quell'uso che da principio gli si concedette, che fu di ridurre al suo lungo le parti de i corpi integrati quando fussero dal suo tutto separate e però in prava disposizione costituite, gli vien levato, ed assegnato pur al moti circolare ». En marge *Moto retto par del tutto escluso in natura.*

La notion de mouvement réel est ici associée à celle de mouvement possible. Association qui a empêché l'auteur de l'énoncé du principe d'inertie - Descartes - d'insérer ce principe dans sa théorie. En effet, pour lui, un mouvement rectiligne n'est pas réel car impliquerait l'existence du vide, ce qu'il refusait.

Grâce à Newton et ses Principes, le principe d'inertie et un principe de relativité restreinte s'intègrent dans un système cohérent qui - nous l'avons vu - introduit des absolus, très différents de ceux d'Aristote.

Cependant, comme le fait remarquer Mme Tonnelat²⁴,

"les difficultés que peuvent rencontrer les définitions newtoniennes sont évidentes dès qu'il s'agit d'incarner les absolus dans un milieu effectivement immobile et universel. Or - nous l'avons dit - tout référentiel susceptible de permettre la mise en évidence d'un mouvement relatif par rapport à lui est nécessairement un système matériel. La notion asymptotique d'espace absolu reste purement spéculative tant que cet espace ne s'incarne pas dans un éther universel ou dans l'ensemble des étoiles fixes. Les absolus newtoniens permettent ainsi l'énoncé d'un problème sans chercher même à le résoudre. Ainsi les questions que se posera l'électrodynamique du XIXème siècle, les critiques de Mach puis d'Einstein, sont latentes dans le texte même des Principia".

Durant tout le XIXème siècle, tous les physiciens cherchèrent à mettre en évidence des mouvements rectilignes et uniformes par rapport à l'éther et à établir le mouvement absolu de la terre dans "L'ESPACE". Nous n'insisterons pas davantage sur ces tentatives, chacun connaissant leurs résultats négatifs.

Voici, pour terminer, un passage du livre "L'évolution des idées en physique" d'Einstein et Infeld⁴⁰, où Einstein démontre qu'il est impossible de matérialiser un observateur en mouvement uniforme : Aristote n'avait peut-être pas tout à fait tort de ne pas chercher à matérialiser un observateur, quel qu'il soit !

Une des questions les plus fondamentales n'a pas encore jusqu'à présent reçu de réponse : existe-t-il un système d'inertie ? Nous avons appris quelque chose sur les lois de la nature, leur invariance par rapport à la transformation de Lorentz et leur validité pour tous les systèmes d'inertie en mouvement uniforme l'un par rapport à l'autre. Nous avons les lois, mais nous ne connaissons pas le cadre auquel il faut les rapporter.

Pour nous rendre mieux compte de cette difficulté, nous voulons interviewer le physicien classique et lui poser quelques questions simples.

— Qu'est-ce qu'un système d'inertie ?

— C'est un SC* où les lois de la mécanique sont valables. Un corps sur lequel n'agit aucune force extérieure se meut uniformément dans un tel SC. Cette propriété nous rend ainsi capables de distinguer un système d'inertie de tout autre.

— Mais quand vous dites qu'aucune force n'agit sur un corps, que signifie cette expression ?

— Elle signifie simplement que le corps se meut uniformément dans un SC d'inertie.

* Système de coordonnées

Ici nous pourrions une fois de plus poser la question : « Qu'est-ce qu'un SC d'inertie ? » Mais comme il y a peu d'espoir d'obtenir une réponse différente de celle de tout à l'heure, essayons d'obtenir quelque information concrète en modifiant la question :

— Un SC rigide lié à la Terre est-il un SC d'inertie ?

— Non, parce que les lois de la mécanique ne sont pas rigoureusement valables sur la Terre, à cause de sa rotation. Un SC rigide lié au Soleil peut être regardé pour beaucoup de problèmes comme un SC d'inertie ; mais quand nous parlons du Soleil en rotation, nous entendons de nouveau qu'un SC qui lui est lié ne peut pas être regardé rigoureusement comme un SC d'inertie.

— Qu'est-il alors, concrètement, votre SC d'inertie, et comment son état de mouvement doit-il être choisi ?

— C'est tout simplement une fiction utile, et je n'ai aucune idée comment on pourrait la réaliser. Si je pouvais seulement m'éloigner assez de tous les corps matériels et me libérer de toutes les influences extérieures, mon SC serait alors un SC d'inertie.

— Mais qu'entendez-vous par un SC libre de toutes les influences extérieures ?

— J'entends que le SC est un SC d'inertie.

Une fois de plus nous nous trouvons devant notre question initiale.

Notre interview révèle une grave difficulté dans la physique classique. Nous avons des lois, mais nous ne savons pas à quel cadre il faut les rapporter, et toute notre structure physique paraît être bâtie sur le sable.

CONCLUSION

Les faits cités ici sont suffisamment éloquents pour qu'il soit inutile d'insister davantage sur les difficultés rencontrées par des esprits puissants lorsqu'ils ont tenté de construire, à partir d'expériences quotidiennes, une physique cohérente s'appuyant sur un formalisme non moins cohérent.

Cependant l'existence et la nature de ces difficultés, parfois similaires à celles que rencontrent les étudiants, sont des éléments qui expliquent en partie pourquoi les raisonnements naturels sont si forts et donc pourquoi il est si difficile de raisonner en termes de référentiel.

Annexe I

Papier de Huyghens retrouvé dans les archives
de Leyde (traduction en anglais donnée par
M. Jammer²⁶).

This may be translated:

For a long time I had thought that rotational motion by means of centrifugal forces contains a criterion for true motion. Indeed, with regard to other phenomena it is the same whether a circular disk or a wheel rotates near me, or whether I circle round the stationary disk. However, if a stone is put on the circumference this will be projected only if the disk rotates, and therefore I formerly thought that circular motion is not relative to any other body. Still, this phenomenon showed only that the parts of the wheel, owing to the pressure acting on the circumference, are driven in relative motion among themselves in different directions. Rotational motion is therefore only a relative motion of the parts, which are driven to different sides, but held together by a rope or other connection.

Now, is it possible to move two bodies relatively without changing their distance? This is indeed possible if an increase in their distance is prevented. An opposite relative motion exists on the circumference. Most people suppose that the true motion of a body consists in its being transferred from a certain fixed place in the universe. This is wrong; for if space is unlimited in all directions, what then is the definition of the immobility of a place? It will perhaps be said that the fixed stars in the system of Copernicus are really at rest; well, they may indeed be mutually immobile with respect to each other; but taken together, relative to what other body are they said to be at rest or in what respect are they to be distinguished from bodies moving very fast in a certain direction? It is therefore impossible to state that a body is at rest in infinite space, or that it moves therein; rest and motion are therefore only relative.

Annexe 2

Extraits du tome II du Dictionnaire Raisonné
de toutes les parties de la physique par
M. Bresson (1790).

MOUVEMENT. Etat d'un corps qui est actuellement transporté d'un lieu dans un autre, soit en totalité, soit en égard seulement à ses parties.]

Il y a plusieurs choses à considérer dans un corps qui se meut ; savoir, 1.^o la force motrice qui imprime le *Mouvement* à ce corps. 2.^o La masse de ce corps par laquelle il résiste à la force qui tend à le faire sortir de son état. 3.^o La direction que prend ce corps dans son *Mouvement*, soit qu'il soit simple, soit qu'il soit composé.]

1.^o Tous les corps, par leur inertie, résistent à toute variation d'état. Un corps qui est en repos, ne se mettra donc jamais en *Mouvement*, s'il n'y a une cause qui lui imprime ce *Mouvement*. Cette cause active qui imprime le *Mouvement* au corps, ou qui du-moins le sollicite à se mouvoir, est ce qu'on appelle la *force motrice*. Il n'y a donc point de *Mouvement* sans force motrice qui l'imprime. (Voyez FORCE MOTRICE.)

MOUVEMENT ABSOLU. Changement de rapport de situation d'un corps respectivement à tous les autres corps qui l'avoisinent ou qui l'entourent. Tel est le *Mouvement* d'un homme qui va d'un lieu à un autre ;]

MOUVEMENT APPARENT. Terme d'*Astronomie*. C'est le *Mouvement* d'un astre, tel que nous en jugeons, ou tel que nous le voyons de la surface de la terre. Ce *Mouvement* diffère du *Mouvement* réel, qui est celui qui seroit apperçu du centre du Soleil. En effet, si nous étions placés au centre du Soleil, nous verrions les astres parcourir des portions de leur orbite égales à celles qu'ils parcourent réellement.

MOUVEMENT RELATIF. Changement de rapport de situation d'un corps, relativement à certains corps qui l'entourent, soit de près, soit de loin ; & non pas relativement à d'autres. Un corps peut être en repos, relativement à quelques-uns des corps qui l'entourent, & en *Mouvement* relativement à d'autres corps. Par exemple, un homme immobile dans un vaisseau qui fait route, est en repos relativement au vaisseau & à ce qu'il contient ; mais il est en un *Mouvement relatif*, eu égard au rivage. Si cet homme, au lieu de se tenir en repos dans le vaisseau, s'y promenoit, il seroit en un *Mouvement relatif* respectivement au vaisseau & respectivement au rivage : car cet homme, par son *Mouvement propre*, changeroit de situation avec les différentes parties du vaisseau ; & par son *Mouvement commun* avec le vaisseau qui le transporte, il changeroit de situation avec les corps qui sont sur le rivage.

VITESSE ABSOLUE. C'est celle d'un corps considérée en elle-même, & sans aucun rapport avec la *Vitesse* d'un autre corps : comme lorsqu'on considère la *Vitesse* d'un cheval qui fait dix lieues en cinq heures de temps. Sa *Vitesse* est de deux lieues par heure. La *Vitesse propre* ou *absolue* d'un corps est donc le rapport de l'espace qu'il parcourt & du temps qu'il emploie à le parcourir,

VITESSE RELATIVE. C'est la *Vitesse* d'un corps comparée avec celle d'un autre corps : comme lorsqu'on compare les *Vitesses* de deux chevaux, qui parcourent le même nombre de lieues, mais dont l'un met plus de temps que n'en met l'autre à parcourir cet espace.]

VI. CRITIQUES ET SUGGESTIONS POUR L'ENSEIGNEMENT

Après avoir mis en parallèle les contenus des modèles naturel et cinématique, analysé leurs points de contact et leurs divergences, il serait tentant d'étudier comment la cinématique est présentée dans l'enseignement : s'agit-il surtout de présentation abstraite, très mathématique, quels exemples sont choisis et pourquoi, quels sont les liens avec la dynamique, quel type de comportement les exercices tendent-ils à développer, etc...

Répondre à toutes ces questions supposerait qu'on fasse une étude critique, complète et systématique, d'un certain nombre de manuels - entreprise fort vaste qui sortirait du cadre de ce travail. Notre but est plus limité : montrer que certaines habitudes permettent au modèle naturel de s'installer confortablement sans que l'étudiant soit jamais contraint de vraiment le remettre en cause.

Nous nous appuierons, pour cette critique, sur un certain nombre de manuels représentant un large éventail de la littérature actuellement disponible (J. Bok et al.⁴¹, P. Alais et al.⁴², A. Brelot et al.⁴³, R. Lennuier et al.⁴⁴, M. Alonso et al.⁴⁵, Zemansky et al.⁴⁶, Berkeley,⁴⁷ F. Strong⁴⁸).

De la lecture de ces manuels se dégage un certain nombre de caractéristiques, communes à l'ensemble :

a) Dans tous ces livres, les postulats de la mécanique classique sont peu discutés, les notions de référentiels et d'observateurs sont en général définies rapidement. Il faut ouvrir un livre de relativité pour voir apparaître une discussion sérieuse des postulats de la mécanique classique destinée à en montrer les limites, ainsi que des

définitions claires des référentiels et observateurs : on voit des schémas représentant des observateurs munis de mètres et d'horloges, à cheval sur une fusée, dans un train... Mais dans le cadre de la cinématique classique, tout ceci paraît inutile, sans doute parce que tout le monde pense que ce sont des évidences.

b) La différence existant entre distances instantanées et distances parcourues, leurs lois de transformation ne sont explicitées dans aucun manuel.

c) La plupart des livres (cours et exercices) additionnent sur le même schéma des vitesses définies dans des référentiels différents, alors que la vitesse et la trajectoire qu'on obtient n'ont de signification, elles, que dans un seul référentiel. Cette façon de faire, très commode, risque de ne pas être bien comprise par l'étudiant, compte tenu de la présence du modèle naturel.

d) Les exercices proposés étudient principalement des situations avec entraînement : c'est justement le cas où les deux modèles divergent le moins : là encore, le modèle naturel peut survivre si l'on ne pose que des problèmes de ce type.

e) Le vocabulaire utilisé est discutable et rarement cohérent : il change souvent entre le cours et les exercices. La plupart des manuels anglo-saxons parlent en termes de vitesse relative alors que la plupart des manuels français introduisent les termes de vitesse absolue, relative et d'entraînement : cette dernière terminologie risque de renforcer l'idée qu'il existe une différence fondamentale entre ces trois vitesses, sinon pourquoi leur donner des noms différents ?

Dans les exercices, qu'il s'agisse des livres français ou anglo-saxons, ces termes disparaissent très souvent au profit d'expressions du type "la vitesse du bateau", "la vitesse du courant", "the velocity of the boat due to its own power" (cf. quelques énoncés d'exercices, un peu plus loin).

De la même façon, l'emploi par les astronomes de termes comme mouvements réels et apparents est peut-être très commode mais risque de renforcer le modèle naturel.

Nous allons revenir en détails sur tous ces points et voir comment on pourrait modifier certaines habitudes.

A. REFERENTIELS - POSITIONS-DISTANCES

Dans la plupart des manuels, un référentiel (ou système de référence ou repère) est caractérisé par un trièdre trirectangle $S(0,x,y,z)$ auquel est lié rigidement un observateur. On parle alors en termes de positions (géométriques) d'un mobile et non en termes d'évènements, ce qui permet d'oublier la variable temps. Cette façon de faire se justifie par le fait que le temps, en mécanique classique, est universel ; mais à l'inconvénient de favoriser une excessive géométrisation du mouvement. L'absence d'horloges pose en effet des problèmes.

Tous les livres introduisent, à un moment donné, l'addition de deux vecteurs définis dans le même référentiel. En particulier, la notion de distance est définie à partir de :

$$(1) \quad \overrightarrow{OM_2} = \overrightarrow{OM_1} + \overrightarrow{M_1M_2}$$

où M_1 est la position du mobile M à l'instant t_1 , M_2 sa position à l'instant t_2 , positions repérées toutes deux dans le même repère $S(0,x,y,z)$. Si, maintenant, on choisit un autre repère S' , au repos par rapport à S et ayant une origine O' différente de O , on peut écrire :

$$\overrightarrow{O'M_2} = \overrightarrow{O'M_1} + \overrightarrow{M_1M_2}$$

ou encore

$$(2) \quad \overrightarrow{O'M_2} - \overrightarrow{O'M_1} = \overrightarrow{OM_2} - \overrightarrow{OM_1} = \overrightarrow{M_1M_2}$$

Cette relation traduit le fait que la distance qui sépare deux positions successives d'un mobile est indépendante de l'origine du repère S considéré - avec comme implicite que ces deux repères sont au repos l'un par rapport à l'autre. Cette propriété s'exprime, par exemple, de la façon suivante : "la distance M_1M_2 est une propriété intrinsèque du segment M_1M_2 et ne dépend évidemment pas du système d'axes qu'a choisi l'observateur. On dit que la distance est invariable par changement de coordonnées. Cette propriété d'invariance est très intéressante puisqu'elle permet de déterminer une grandeur invariable dans un repère arbitraire sans avoir à se soucier des changements de repères ultérieurs" (J. Bok et al. p. 18).

Nous n'avons cité qu'un seul livre, car on constate que l'on trouve le même type de discours, à des détails minimes près, dans tous les autres manuels.

Cette démarche est nécessaire ; mais il importe de regarder ce qui se passe au chapitre changements de repères.

Tous les cours, pour obtenir une loi de transformation des vitesses, partent de :

$$(3) \quad \overrightarrow{OM_1} = \overrightarrow{OO'_1} + \overrightarrow{O'_1M_1}$$

où M_1 est la position du mobile M, relevée à l'instant t_1 dans le repère S, et O'_1 la position de l'origine O' du repère S', mesurée dans S à ce même instant t_1 .

Tous les manuels s'arrêtent là. Aucun ne relève la différence existant entre les relations (I) et (3), aucun ne revient sur la propriété (2) pour montrer ce qu'elle devient lorsque S' est en mouvement par rapport à S. Bien que les deux relations (1) et (3) soient obtenues, toutes deux, à l'aide d'une relation de Chasles, elles sont en fait très différentes :

- La relation (1) fait intervenir les positions successives

du mobile M repérées dans un même repère. Si l'on était puriste, on devrait l'écrire sous la forme :

$$(1') \quad \overrightarrow{OM_2(t_2)} = \overrightarrow{OM_1(t_1)} + \overrightarrow{M_1(t_1)M_2(t_2)}$$

afin de bien montrer que M est repéré à deux instants différents.

- La relation (3) relie, dans le même référentiel, les positions du mobile M repérées au même instant par rapport à deux origines différentes O et O'. Là encore, si on était puriste, on devrait écrire (3) sous la forme :

$$(3') \quad \overrightarrow{OM_1(t_1)} = \overrightarrow{OO'_1(t_1)} + \overrightarrow{O'_1(t_1)M_1(t_1)}$$

Mais l'écriture de cette relation, sous la forme (3) ou (3') utilise implicitement l'invariance des distances instantanées, c'est-à-dire, dans le cas présent :

$$[\overrightarrow{O'M_1(t_1)}]_S = [\overrightarrow{O'M_1(t_1)}]_{S'}$$

Les cours utilisent donc sans le dire l'invariance des distances instantanées que l'on peut exprimer de façon plus générale par :

$$[\overrightarrow{M'M(t)}]_S = [\overrightarrow{M'M(t)}]_{S'}$$

où M et M' sont les positions des deux mobiles ponctuels ou de deux points d'un mobile unique, non ponctuel, relevées au même instant dans chacun des deux repères. C'est en explicitant (4) et en indiquant les instants où les mesures sont réalisées, que l'on arrive aisément à la loi de composition des distances parcourues, c'est-à-dire :

$$(5) \quad [\overrightarrow{M_2(t_2)M_1(t_1)}]_S = [\overrightarrow{O_2O_1}]_S + [\overrightarrow{M_2M_1}]_{S'}$$

où $(M_2M_1)_S$ est la distance parcourue par le mobile M dans le repère S, $(M_2M_1)_{S'}$ la distance qu'il parcourt dans le repère S' et $(O_2O_1)_S$ la distance qui sépare les positions successives de l'origine O' du

repère S' , mesurées aux instants t_1 et t_2 dans S . C'est cette dernière distance qui fait intervenir le temps et le mouvement de S' par rapport à S .

Rester silencieux sur tous ces problèmes n'est pas sans conséquences : les étudiants traitent de la même façon les distances parcourues et instantanées : ce sont, toutes deux, des propriétés intrinsèques du mouvement qui ne dépendent pas de l'origine spatiale (représentée dans un espace intemporel) du repère choisi.

Cette lacune explique aussi pourquoi, lorsqu'ils apprennent la relativité restreinte, où pourtant les notions de référentiels et d'observateurs sont très explicitées, la plupart des étudiants dilatent ou contractent indifféremment les longueurs, et, à l'inverse, contractent toutes les distances - quellesqu'elles soient -, lorsqu'ils ont appris par coeur la formule de contraction de Lorentz. Ce comportement résulte - nous semble-t-il - d'une incompréhension de la cinématique classique et non de la cinématique relativiste : l'étudiant ne voit pas pourquoi, en relativité, les distances (parcourues ou instantanées) cesseraient d'être une propriété intrinsèque et géométrique du mouvement.

Pour remédier à cet état de fait, nous ne proposons pas de faire du purisme en écrivant les relations (1) et (3) sous les formes (1') et (3') - bien que l'imprécision existante entraîne une généralisation abusive de la relation (2) - mais de définir de façon sérieuse les notions de référentiels, d'observateurs, les distances parcourues et instantanées (cf. cours de relativité). Ces définitions pourront être fructueuses si elles sont accompagnées d'exercices où l'on demande, à chaque fois, de tracer, dans plusieurs référentiels, ces deux types de distances, de construire, point par point, les distances parcourues dans chaque référentiel afin de comprendre ce que signifie "déplacement par rapport à", de montrer que cette construction s'appuie sur les relations (2), (3) et (4) et que les résultats obtenus par construction et par le calcul sont identiques. Tant que l'étudiant n'aura pas perçu le caractère relatif d'un déplacement, la nécessité

de préciser par rapport à quoi et à qui on le mesure, il est peu probable que le formalisme enseigné soit acquis, utilisé et remplace le modèle naturel.

B. LES VITESSES

Bien que l'ensemble des manuels introduisent la loi de composition des vitesses, ils ne se préoccupent absolument pas des problèmes que nous venons de soulever. Nous n'y reviendrons pas : notre critique portera sur le type d'exercices et de schémas géométriques proposés.

1. Les situations proposées

La majorité des exercices traitent de problèmes d'entraînement. Voici quelques exemples des différents thèmes étudiés :

- I. Un voyageur se déplace en sens inverse de la marche du train dans un wagon animé d'une vitesse de 72 km/h. Sachant que le voyageur se déplace dans le wagon avec une vitesse de 2 mètres à la seconde, calculer sa vitesse par rapport à la voie.

Notons au passage, que les termes de vitesse absolue, relative et d'entraînement, présents dans la partie Cours de ce livre, sont absents dans l'énoncé de cet exercice.

Exercice 7.3.4.

Un bateau doit traverser une rivière. Sachant que le bateau a une vitesse constante u en module, que la rivière a une largeur d et que le courant de la rivière a une vitesse v , calculer le temps que mettra le bateau pour atteindre l'autre rive : 1) par le chemin le plus court en distance; 2) par le chemin le plus rapide (en temps). Étudier le cas où $u > v$ et $u < v$.

(Même remarque que plus haut pour la terminologie).

6.8 Un fleuve coule vers le nord à la vitesse de 3 km hr^{-1} . Un bateau va vers l'est avec une vitesse de 4 km hr^{-1} par rapport à l'eau. (a)

Calculer la vitesse du bateau par rapport à la rive. (b) Si le fleuve a 1 km de large, calculer le temps nécessaire pour le traverser. (c) Quelle est la déviation vers le nord subie par le bateau quand il atteint l'autre rive?

4-37. A motor boat is observed to travel 10 mi hr relative to the earth in the direction 37° north of east. If the velocity of the boat due to the wind is 2 mi hr eastward and that due to the current is 4 mi hr southward, what is the magnitude and direction of the velocity of the boat due to its own power?

M. Alonso et al. (p. 157)

Zemansky et al. (p. 97)

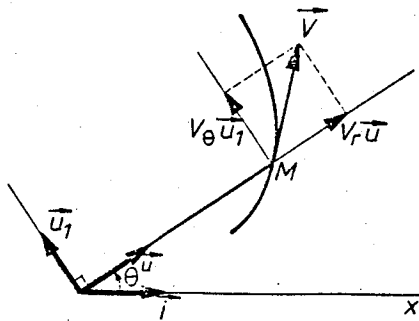
(Pour ces deux derniers exemples, notons que les cours parlent uniquement en termes de vitesse relative).

Trois thèmes se retrouvent dans tous ces exercices : entraînement par un wagon (premier exercice), entraînement par l'eau (exercices 2 et 3) et enfin entraînement par le vent (dernier exercice).

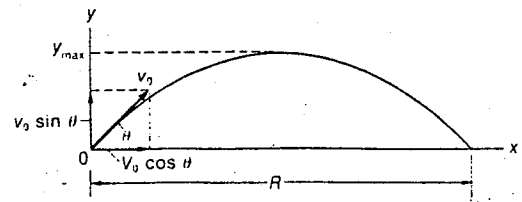
Nous avons vu que c'est pour ce type de situation que les deux modèles divergent le moins : si les exercices avec entraînement sont intéressants puisqu'ils constituent une première étape vers la compréhension du phénomène étudié, il est insuffisant de s'en tenir à ces seuls exercices. Il faut ensuite introduire des exercices sans entraînement afin d'amener l'étudiant à déconnecter le moteur du mouvement. Les situations avec entraînement permettent ainsi de faire la transition entre le modèle naturel, et les situations sans entraînement d'arriver au modèle cinématique. Par exemple, les exercices de la rivière et du caillou peuvent être utilisés avec profit. De même une expérience du type de celle que nous avons réalisée avec les enfants permet de déconnecter le moteur du mouvement : l'étude en parallèle des situations des expériences A et C (le moteur change de support de l'une à l'autre) est un bon moyen d'atteindre ce but, en vérifiant que les résultats auxquels on aboutit sont les mêmes si les vitesses relatives sont les mêmes et non les vitesses des moteurs.

2. Les schémas géométriques

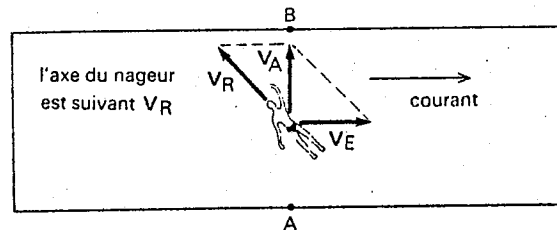
Voici trois schémas géométriques, tirés de divers ouvrages.



P. Alais (p. 7)



F. Strong (p. 49)



J. Bok et al. (p. 31)

Comment différencier ces trois types de schémas si l'on n'a pas compris ce qu'ils représentent ? Le dernier (composition des vitesses) risque d'être mis sur le même plan que les deux autres (composantes d'un vecteur). Dans le contexte actuel, ce troisième schéma, bien que très commode, a bien des chances de ne pas être compris comme on le souhaiterait.

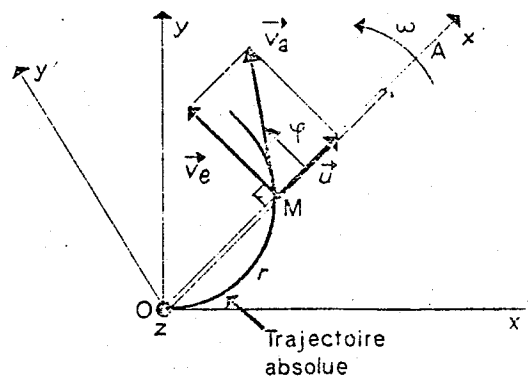
Il nous semble que, là encore, il faudrait faire deux schémas : l'un dans le référentiel des berges où seules v_A et v_E sont définies et l'autre dans le référentiel de l'eau où seule v_R est définie ; puis montrer comment, à partir de la relation (3) et de la loi de composition des vitesses qui en découle, on peut se ramener à un schéma unique qui a l'avantage d'être simple - pour celui qui a compris ce qu'il signifie - mais qui a l'inconvénient de superposer deux points de vue différents. C'est en démontant ensemble - étudiants et enseignants - les pièges de ces schémas, en expliquant les raisons d'une telle procédure, en traitant des exercices avec et sans entraî-

nement que les vitesses ont des chances de devenir relatives et de ne plus être attachées aux moteurs.

C. LES TRAJECTOIRES

De façon générale, les cours de cinématique ne s'intéressent pas explicitement à la transformation des trajectoires par changements de référentiels.

Dans les manuels d'exercices, on trouve quelques exercices qui demandent de tracer une trajectoire dans un référentiel : voici un exemple extrait de J.P. Maury.⁵⁴



J.P. Maury, p. 62

La trajectoire est obtenue à l'aide d'une composition de vitesses, c'est-à-dire à partir de vitesses définies dans des référentiels différents alors que la trajectoire tracée n'a de signification, elle, que dans un seul référentiel. Comment s'y retrouver si on n'a pas compris un tel schéma ?

Très peu de manuels demandent les trajectoires d'un mobile dans deux référentiels différents. Dans le livre de Lennuier et al., un exercice concerne ce point : on constate alors que celles-ci sont obtenues à l'aide d'un calcul, que le résultat obtenu n'est accompagné d'aucun commentaire et qu'aucune trajectoire n'est tracée. Cette façon

de faire ne serait pas gênante si l'on était sûr que les étudiants comprennent effectivement comment ces trajectoires sont obtenues et ce qu'elles représentent. Nos expériences sont là pour nous indiquer qu'un tel discours n'est pas compris. Que faire ?

Il nous semble qu'il serait fructueux de faire tracer qualitativement - c'est-à-dire point par point - les trajectoires dans les différents référentiels en jeu. Ceci exige de choisir des cas simples (repères galiléens, cercle se transformant en droite) et non des cas complexes pour lesquels il serait difficile de faire tant les calculs que cette construction. En effet, si l'on veut pouvoir comparer les résultats obtenus par le calcul à ceux obtenus à partir d'une telle construction, il faut se limiter à des cas simples : l'intérêt est d'illustrer le changement de référentiels opéré afin de faire saisir ce qu'il signifie et d'illustrer le calcul par une opération manuelle qui est sans doute beaucoup plus parlante que n'importe quel discours théorique sur la question. Par ailleurs, ce type d'activité a l'avantage de mettre à nu les divergences qui existent entre les deux modèles. Les nombreux allers et retours entre la réponse spontanée de l'étudiant, la réponse obtenue qualitativement et la réponse formelle devraient permettre à l'étudiant de comprendre ce que signifie le formalisme enseigné et de l'utiliser plus aisément lors de situations plus complexes.

D. LE VOCABULAIRE

Nous nous sommes souvent référés au vocabulaire, qui est en partie commun aux deux modèles. Tant que nous n'aurons pas montré aux étudiants la nécessité de définir toute grandeur cinématique dans un référentiel, tant que nous n'aurons pas déconnecté le moteur du mouvement, tant que nous n'aurons pas montré qu'un mouvement ne se représente pas dans un espace unique, le vocabulaire utilisé restera ambigu, et la précision "vitesse par rapport à" ne servira à rien, puisque cette précision répond à une question que les étudiants ne se posent pas.

Il nous paraît souhaitable, toutefois, de supprimer certains termes comme ceux de vitesses absolue, relative et d'entraînement (que l'on trouve en abondance dans les manuels français) et de les remplacer par celui de vitesse relative, afin que l'étudiant ne puisse se raccrocher à cette terminologie pour définir les vrais mouvements et les mouvements apparents.

Il paraît souhaitable que disparaissent certaines expressions telles que "en réalité", "il semble que". Ceci paraît cependant bien difficile dans la mesure où ce vocabulaire est employé fréquemment dans le langage courant, les revues de vulgarisation, etc. En revanche, il est possible de faire analyser certains de ces textes par les étudiants et de voir avec eux ce qu'ils signifient exactement et ce qui ne va pas. Voici quelques exemples :

Livre de géographie - classe de 6ème⁵⁷.

"Vus d'un train en marche, les arbres et les maisons semblent défiler sous vos yeux. En réalité, c'est le train qui roule. De même, au cours d'une journée, le soleil semble décrire une vaste courbe dans le ciel ; en fait, il ne se déplace pas, c'est la terre qui tourne sur elle-même".

Livre de cosmographie -⁵⁸.

33. Explication du mouvement diurne. — Pour les observateurs terrestres, la sphère des fixes semble tourner autour d'un diamètre P'P dans le sens rétrograde parce qu'en réalité, la Terre tourne autour du diamètre p'p dans le sens direct (fig. 25). L'illusion est identique à celle d'un voyageur à la portière d'un train, qui voit le paysage se déplacer vers sa gauche (par exemple) parce que le train marche vers sa droite.

De même, nous pouvons lire plus loin :

106. Preuve du déplacement de la Terre autour du Soleil : l'aberration annuelle des étoiles.

Le mouvement circulaire quasi uniforme de la Terre autour du Soleil a lieu à la vitesse de 30 km par seconde, vitesse faible, mais non négligeable par rapport à la vitesse de la lumière : 300 000 km/s.

Ce déplacement de la Terre en même temps que lui parvient la lumière d'une étoile modifie légèrement la direction apparente de cette étoile, par un phénomène

analogue à celui par lequel nous croyons voir la pluie tomber obliquement quand nous sommes dans un véhicule en mouvement sous une pluie verticale (traces obliques des gouttes sur les vitres).

Démontrer avec les étudiants les pièges du vocabulaire est une entreprise difficile, mais très formatrice : l'expérience prouve que si certains étudiants sont un peu déconcertés par ce type d'activités, ils en comprennent vite l'intérêt.

E. CONCLUSION

Les cours et les exercices ne réussissent pas à lever toutes les difficultés dues à l'existence du modèle naturel. Celles-ci ne pourront être levées qu'à l'aide d'une véritable cinématique qui ne soit pas une dynamique déguisée. Faut-il enseigner la dynamique avant la cinématique ou garder l'ordre de présentation actuel ? A notre avis, l'ordre de présentation n'est pas déterminant - mais il faudrait le vérifier -. En effet, si l'enseignement n'insiste pas plus qu'il le fait sur les notions de référentiels et d'observateurs, s'il n'insiste pas sur la différence qu'il y a entre l'observateur physicien (un robot qui fait des mesures) et l'observateur quotidien (quelqu'un qui voit, qui a des sensations), les difficultés propres au modèle naturel resteront, et ceci quel que soit l'ordre de présentation choisi.

Tout ce que nous venons de voir permet de suggérer d'autres formes d'exercices ; des présentations de problèmes du type de celles de nos tests se révèlent en général assez formatrices : à part le fait que ces tests soulèvent facilement des discussions entre étudiants, ils leur révèlent la distance qu'il y a entre leur propre compréhension et celle du physicien.

Au-delà de la variété d'exercices que l'on peut proposer (à comparer avec la pauvreté actuelle), trois points doivent être présents à l'esprit :

a) Déconnecter tout mouvement de sa cause motrice. On peut y arriver en étudiant des problèmes avec et sans entraînement, afin que l'étudiant perçoive bien le caractère relatif de la vitesse, en

faisant calculer des vitesses dans des référentiels différents afin de les habituer à confronter des points de vue différents et de ne plus attribuer un caractère privilégié à l'une de ces vitesses. Une question simple comme celle qui a été soulevée dans le film (lorsque je suis sur un tapis roulant, si je lance une clé en l'air, au-dessus de ma tête, où retombe-t-elle ?) permet d'éliminer un grand nombre de problèmes spécifiques du modèle naturel.

b) Réintégrer la variable temps dans les problèmes de mouvement. Là encore, en confrontant des points de vue différents, on peut voir comment les distances parcourues et les distances instantanées se transforment par changements de référentiels - ce qui nécessite d'introduire clairement la notion de distance instantanée. Cette confrontation devrait faire apparaître où et comment le temps intervient dans cette affaire : des exercices du type de ceux des tests de l'expérience dépassement sont, de ce point de vue, fort efficaces.

De même, tracer pour un même objet les trajectoires qu'il suit dans deux ou plusieurs référentiels différents, montrera qu'elles ne se transfèrent pas en bloc d'un repère à l'autre, et que lorsqu'il y a transformation, l'une n'est pas plus réelle que l'autre.

c) Redonner tout son sens au formalisme. Les étudiants ont selon le problème proposé deux types de comportement : avec des problèmes du style de ceux de nos tests, ils utilisent fort peu, voire jamais, le formalisme, alors qu'avec des problèmes traditionnels, c'est le contraire : l'emploi de formule, comme $\vec{v}_a = \vec{v}_r + \vec{v}_e$ ne prouve absolument pas que le problème physique est compris. Par ailleurs, nous avons constaté lors de l'analyse de copies d'examen (partie III, § B1) qu'un certain nombre de résultats "corrects" exprimés à l'aide d'une formule, correspondaient, en fait, à une utilisation erronée du formalisme et une compréhension du phénomène physique assez éloignée de celle du physicien.

C'est pourquoi il nous semble important de traiter tout exercice non seulement qualitativement, mais aussi par le calcul afin que chaque étape du raisonnement formel soit bien décortiquée, comprise et assimilée.

Ceci nécessite de s'attaquer de front aux problèmes de changements de référentiels. Certains penseront que cette entreprise n'est peut-être pas nécessaire puisque la majorité des phénomènes quotidiens se passent sur terre et que l'on n'a pas souvent l'occasion de changer de repères. Toutefois, cette entreprise nous paraît indispensable si l'on veut acquérir une dynamique correcte (en particulier étudier les problèmes de frottement) et si l'on veut comprendre certains postulats de la mécanique. Comment comprendre les lois les plus importantes de la physique si l'on n'a pas saisi l'importance et l'origine des invariants galiléens ? Cette entreprise peut commencer bien avant l'université - on a vu comment les lycéens réagissaient lors du film -, et même bien avant la classe de seconde : les enfants de 11 ans (CM₂) réagissent et modifient leur réponse initiale (cf. partie IV). Tout ceci suppose de croire à l'existence du modèle naturel et d'agir en conséquence.

CONCLUSION GENERALE

Récapitulons, au terme de cet exposé, les principales étapes du travail entrepris.

Une enquête préliminaire (chapitre I) a permis de situer quelques-unes des difficultés rencontrées par des étudiants lorsqu'ils doivent résoudre des problèmes de changements de repères galiléens.

Un large éventail de tests construits autour de situations physiques simples (chapitre II) a permis de dégager les éléments d'une cinématique estudiantine.

L'ensemble de ces éléments ont été regroupés (chapitre III) pour dégager ce que nous avons appelé "le modèle naturel". Si certains raisonnements semblent parfois coïncider avec ce que l'on enseigne, d'autres s'en écartent énormément. Ceci est dû principalement au fait que la notion de référentiel (au sens cinématique du terme) est totalement absente du raisonnement estudiantin. Ce dernier s'appuie sur deux éléments différents mais non contradictoires, car complémentaires : - le mouvement d'un objet est tout d'abord défini dynamiquement à partir du - ou des - moteur (au sens cause motrice) qui le crée,
- tout mouvement est décrit dans un espace - celui où évoluent objets et observateurs - unique et indépendant des observateurs.

Dans cet espace, l'objet peut cependant avoir deux mouvements différents :

- Un mouvement réel ou vrai créé soit par le seul moteur propre de l'objet (le mouvement propre), soit par deux moteurs : celui de l'objet et un autre extérieur (moteur d'entraînement), lié physiquement

au moteur propre (mouvement résultant). Ces mouvements réels, indépendants des observateurs, dépendent uniquement de l'état de fonctionnement de chacun des moteurs et de l'existence du lien qui assure l'entraînement lorsque ce dernier existe.

- Un mouvement apparent obtenu soit à partir d'une observation visuelle ("X voit...") qui ne peut s'expliquer à l'aide des moteurs associés à l'objet, soit en supprimant par la pensée l'effet de l'un de ces moteurs ("S'il n'y avait pas de courant, le mobile irait..."). Un observateur devient un personnage qui voit des choses "dénudées de toute réalité physique" ou encore "illusoires", qui a des impressions ("On a l'impression de voir..., mais en réalité..."). Ce caractère fictif ou illusoire du mouvement apparent conduit les étudiants à ne considérer, dans les problèmes, que les seuls mouvements vrais.

Cette compréhension des mouvements et des observateurs implique une conception très particulière des grandeurs cinématiques. Les changements de référentiels ont, de ce point de vue, servis de révélateurs en nous indiquant comment les concepts eux-mêmes étaient perçus :

- Les propriétés du moteur propre de l'objet étant attribuées à l'objet, celui-ci possède une vitesse : concept causal dynamique mal défini englobant très souvent ceux de force et de puissance ("la vitesse du caillou est la force réelle à savoir la force musculaire du lanceur", "les moteurs ont même puissance, même force, même vitesse").

- Si, grâce à son moteur, un objet peut parcourir pendant un intervalle de temps une distance, celle-ci est déterminée géométriquement à l'aide des positions successives de l'objet, repérées l'une par rapport à l'autre et non par rapport à un observateur ("l'objet reste toujours dans le même plan vertical par rapport à l'endroit où il est"). Ces positions sont ainsi figées dans cet espace unique, géométrique et intemporel en ce sens que le temps n'intervient que comme durée finie du passage d'un lieu à un autre. Cette excessive

géométrisation des distances parcourues conduit les étudiants à les traiter comme des longueurs ou distances instantanées.

- Les trajectoires sont géométrisées, même si elles sont construites dynamiquement.

Ces raisonnements commencent à s'établir dès l'enfance et s'installent si bien durant l'adolescence que l'enseignement n'arrive pas vraiment à les ébranler (parties VI et IV).

L'étude des développements historiques de la mécanique est l'occasion de mesurer à quel point la notion de mouvement privilégié est tenace et résistante : le fondateur de la mécanique classique ne désirait-il pas définir dynamiquement les mouvements réels ? Ses successeurs n'ont-ils pas déployé tout un arsenal d'expériences en vue de détecter le mouvement relatif de la terre par rapport à un éther ? (partie V).

Tout ceci indique que la théorie des changements de référentiels, et que le principe de relativité qui en est à l'origine, ne sont ni simples, ni naturels. Même si chacun sait que "tout mouvement est relatif", rien, dans les expériences quotidiennes ne favorise la remise en cause des raisonnements naturels, ni ne contraint d'admettre un formalisme, même limité. Or, ce principe de relativité constitue "la pierre angulaire qui permet de construire une physique théorique à partir d'expériences significatives" (Mme Tonnelat, p. 5)²⁴.

Il est donc nécessaire de consolider la manipulation du modèle formel afin d'arriver à des définitions claires des concepts en jeu, à des relations entre ces concepts qui ne dépendent pas des différentes situations étudiées - à condition, bien sûr, que le formalisme s'applique à celles-ci -, et à comprendre l'origine et la signification des invariants. Cette manipulation ne prendra tout son sens que s'il est possible de comparer, à tout moment, les deux types de raisonnement (naturel et cinématique). Sans une confrontation permanente entre le formalisme et le réel et les raisonnements qui en découlent, il

semble difficile de maîtriser le formalisme et de l'appliquer, avec confiance, lors d'étude de situations concrètes plus ou moins complexes.

Ceci suppose que l'enseignant connaisse non seulement toutes les subtilités du modèle naturel afin d'en détecter rapidement les effets, mais aussi qu'il dispose d'outils simples, facilement exploitables, qui favorisent cette remise en cause des raisonnements naturels. Les quelques suggestions de la partie VI sont insuffisantes.

Alors que nous ne nous sommes volontairement limités qu'à un aspect ponctuel de la cinématique, nous constatons, à l'issue de cette étude, que beaucoup reste à faire. Deux axes de recherche peuvent ainsi être définis :

- Approfondissement des connaissances concernant les raisonnements naturels. De nombreuses questions restent en effet sans réponse : quelle est la signification de l'indifférenciation partielle entre vitesse et force lorsque les mouvements considérés sont uniformes, comment sont maîtrisées les relations et les lois de la mécanique, la notion de mouvement privilégié et l'existence d'un espace unique ont-elles des conséquences dans d'autres domaines que celui de la cinématique ?...

- Recherche d'outils d'enseignement facilement utilisables par les enseignants, faisant appel à un matériel peu complexe et peu onéreux. Ces outils devraient non seulement permettre aux étudiants et aux élèves de prendre conscience du fossé qui existe entre leur propre raisonnement et celui qu'impose le modèle formel, mais aussi les aider à appréhender le monde réel sous un jour nouveau, grâce à un approfondissement des lois et concepts fondamentaux de la physique.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 Bulletin de l'Union des Physiciens, Suppl. au n° 594 (1977)
- 2 R. Diaz, M. Ralmy, Lire Piaget n° 40, Collection psychologie et Sciences Humaines, Dessart
- 3 L. Viennot, Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. Thèse, Université Paris VII (1977)
- 4 L. Viennot, Sens physique et raisonnement formel en dynamique élémentaire II. Bulletin de la Société de Physique, Encart pédagogique, p. 59-66 (juillet 1975)
- 5 J. Crepault, La notion de simultanéité, Thèse, Université Paris VIII (1975)
- 6 Compte-rendu du module Astronomie. Groupe de travail de la Commission de Renovation de l'Enseignement de la Physique (non publié)
- 7 A. Koyré, Etudes Galiléennes, Hermann, Paris (1966)
- 8 Etudes d'Epistémologie génétique, tome XXVI. Les explications causales. PUF Paris (1971)
- 9 Logique et connaissance scientifique. Encyclopédie de la Pléiade, Gallimard (1973)
- 10 J. Piaget, Les notions de mouvement et de vitesse chez l'Enfant, PUF Paris (1946) 2è. éd. Paris (1972) p. 69
- 11 Cf. 8, p. 147
- 12 Cf. 10, 2è éd., p. 110
- 13 Cf. 8, p. 50
- 14 Cf. 8, p. 146
- 15 Cf. 10, 2è éd., p. 277
- 16 Cf. 10, 2è éd., chap. V
- 17 Cf. 10, 2è éd., p. 99-100
- 18 Cf. 10, 2è éd., p. 106

- 19 Cf. 10, 2è éd. chap. VIII
- 20 Cf. 10, 2è éd., p. 176
- 21 Cf. 10, 2è éd., p. 180-182
- 22 L. Maury, E. Saltiel, L. Viennot, Etude de la notion de mouvement
chez l'enfant à partir des changements de référentiels.
Revue Française de Pédagogie, vol. 40, p. 15 (1977)
- 23 J. Piaget, B. Inhelder, L'image mentale chez l'enfant, PUF,
Paris (1966)
- 24 Cité par M.A. Tonnelat, Histoire du Principe de Relativité,
Flammarion, Paris (1974)
- 25 I. Newton, Principes mathématiques de la philosophie naturelle,
1687. Cité par A. Koyré dans "Du monde clos à l'Univers
infini", Gallimard (1973)
- 26 M. Jammer, Concepts of space, Harvard University Press (1969) p. 104
- 27 C. Huyghens, Oeuvres complètes, Vol. 10, p. 681 ; cité par
M. Jammer (cf. 26, p. 123)
- 28 Cf. 26, p. 125
- 29 C. Maclaurin, Account of Sir Isaac Newton's philosophal disco-
veries, Livre 2, chap.1, Londres 1748, cité par M. Jammer
(cf. 26, p. 130)
- 30 M. Bresson, Dictionnaire Raisonné de toutes les Parties de la
Physique, Tome II, Paris (1790)
- 31 G. Bruno, La Cena de le ceneri, III, 5; Opere Italiane, ed.
Wagner, Lipsiae, 1830 ; cité par A. Koyré (cf. 7, p. 173)
- 32 G. Bruno, La Cena de le ceneri, cité par M.A. Tonnelat (cf. 24,
p. 30)
- 33 G. Bruno, La Cena de le ceneri, cité par A. Koyré (cf. 7, p. 175)
- 34 T. Brahe, Epistolarum Astronomicarum liber, Uranienburgi,
MDXC II; ed. Dreyer, Hafniae 1919, cité par A. Koyré
(cf. 7, p. 184-185)
- 35 J. Kepler, Lettre à Fabricius, 10 Nov. 1608 ; cité par A. Koyré
(ref. 7, p. 196-197)
- 36 J. Kepler, In commentaria de Motibus Martis, n°21, Opere, ed.
Frisch ; cité par A.Koyré (cf. 7, p. 194)
- 37 J. Kepler, Lettre à Fabricius, 10 Nov. 1608 ; cité par A. Koyré
(cf. 7, p. 199)
- 38 G. Galiléo, Dialogo II, cité par A. Koyré (cf. 7)
- 39 G. Galiléo, Dialogo I, cité par A. Koyré (cf. 7, p. 209)

- 40 A. Einstein, L. Infeld, L'évolution des idées en physique,
Flammarion
- 41 J. Bok, P. Morel, Mécanique Ondes, Hermann, Paris (1968)
- 42 P. Alais, M. Hulin, J. Gacougnolle, Mécanique, Tome 4, Du cours
aux applications, Armand Colin, Paris (1970)
- 43 A. Brelot, N. Hulin-Jung, J. Klein, E. Saltiel, Mécanique-Ondes,
Travaux dirigés, Hermann, Paris (1967) 2^e éd. Paris (1970)
- 44 R. Lennuier, P.Y. Gal, D. Perrin, Mécanique des particules-champs.
Collection U. Armand Colin, Paris (1970)
- 45 M. Alonso, E.J. Finn, Physique Générale, tome I. Inter European
Ed., distribué par Ed. du Renouveau Pédagogique, Montréal,
Paris (1973)
- 46 N.W. Zemansky, F.W. Sears, University Physics Addison Wesley
- 47 C. Kittel, W. Kingh, M.A. Rudelman, Mechanics Berkeley Physics
Course. Mc Graw-Hill book Company (1965)
- 48 F. Strong, General Physics Workbook, W.H. Freeman and Company
(1972)
- 49 Livre de Géographie - classe de sixième. Collection Pernet-
Hachette (1972)
- 50 E. Brachet, P. Couderc, J. Dumarque, Cosmographie, Delagrare,
Paris (1957)
- 51 J.P. Maury, Mécanique tome I, Du cours aux applications, Armand
Colin, Paris (1970)

